



รายงานการวิจัย

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์

ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

**Flow Simulation of Starch in Extruder with
Computational Fluid Dynamics Programming**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูดเดอร์

ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

**Flow Simulation of Starch in Extruder with
Computational Fluid Dynamics Programming**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม/2553

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีใน

การสนับสนุนงบประมาณเพื่อ โครงการวิจัยนี้



บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยเรื่องการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเป็นการศึกษาถึงการไหลแบบทำนายนทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิทยากระแสของวัตถุดิบอาหารจำพวกแป้งโดร่วมกับโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดซึ่งจัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนที่เกิดในเครื่องเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้เข้าใจและได้แบบสมการคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าของกลุ่มตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดของเครื่องเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ค่าความร้อนในรูปของอุณหภูมิที่ใช้แปรรูปแป้งโด ความเร็วรอบหมุนของเพลาสกรู และตัวแปรด้านรูปทรงทางเรขาคณิตของแบบสกรู (ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล) ขอบเขตการศึกษาวิจัยเป็นการศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งโดเข้าไว้ในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว การจำลองทำโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Fluent[®] ซึ่งกำหนดให้มีสถานะแปรรูปแบบอุณหภูมิคงตัว และสมมติให้สภาวะการไหลเป็นแบบไม่อัดตัว การตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองพฤติกรรมการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยืนยันโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำเชื่อมข้าวโพดซึ่งจัดเป็นของไหลชนิดนิวโทเนียนกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ตามแบบสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li และ Hsieh สำหรับของไหลชนิดนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว ส่วนการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันทำโดยเทียบกับทั้งผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Rauwendaal สำหรับของไหลชนิดนอนนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว และค่าจากผลการทดสอบผลิตรจริง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

The research report entitled “Flow Simulation of Starch Dough in Extruder with Computational Fluid Dynamics Programming” studied an application of the computational fluid dynamics program together with the rheological model of starch dough to create the predictive models for flow behavior of starch dough, which is considered to be a non-Newtonian fluid, in the extruder. The study was aimed to understand and obtain the mathematical models for the prediction of the change of flow behavior under the effect of process variables for extrusion process listing as a moisture content of raw material, a heating value in term of process temperature, rotating speed, and screw configuration (only for the channel depth ratio). The research scope was to study the flow behavior of rice starch dough in the single screw extruder by applying Fluent® program. Flow simulation was limited to an isothermal process under the incompressible fluid flow. Validation of predictive results was carried out by comparison to either the analytical solution or the experimental measurements. For the validation of simulation procedures, corn syrup, a Newtonian fluid, was used and the flow simulation results were compared to the analytical solutions for flow behavior proposed by Li and Hsieh. Where as, the simulated results of rice starch dough, a Non-Newtonain fluid, in the single screw extruder were compared to both analytical solutions proposed by Rauwendaal and the actual measuring data.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	1
ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
ทางด้านเศรษฐกิจ.....	5
ทางด้านวิชาการ.....	6
หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
สมการควบคุมการไหล.....	6
การวิเคราะห์การไหล.....	6
สมการอนุพันธ์มวล.....	8
สมการอนุพันธ์โมเมนตัม.....	8
สมการอนุพันธ์พลังงาน.....	9

สมการวิทยากระแสของเป็ง.....	9
สมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับเครื่องเอกซ์ทรูชัน ชนิดสกรูเดี่ยว.....	10
สมการสำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน.....	10
สมการสำหรับของไหลแบบนอนนิวโทเนียน.....	14
สมการคำนวณตัวแปรไร้มิติผลต่างความดัน และตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลเชิงมวล ของผลิตภัณฑ์.....	15
สมการคำนวณวิธีเชิงตัวเลขเพื่อการจำลองการไหล.....	16
การทำ Discretization ให้กับการถ่าย โอนปริมาณสเกลาร์.....	17
การทำ Discretization ให้กับสมการการถ่าย โอนโมเมนตัม.....	18
การทำ Discretization ให้กับสมการ การอนุรักษ์มวล.....	19
รูปแบบสมการเชิงเส้นของสมการไม่ต่อเนื่อง.....	20
Under Relaxation.....	20
การประมาณค่าอนุพันธ์.....	20
Cell-Based Derivative Evaluation.....	21
Node-Based Derivative Evaluation.....	21
The Coupled Solver.....	22
สมการควบคุมในรูปเวกเตอร์.....	22
Preconditioning.....	23
Time Marching for Steady-State Flows.....	24
Implicit Scheme.....	25

บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย

มิติและรายละเอียดของสกรู.....	1
กรรมวิธีการสร้าง Mesh Element	4
กรรมวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	4
กรรมวิธีตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนเซลล์ที่สร้างเพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	5
กรรมวิธีแปลงรูปผลการจำลองการไหลเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ระหว่างตัวแปรหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิต.....	7
วิธีการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล.....	7
วิธีการวัดความชื้น.....	7
วิธีการวัดความหนาแน่น.....	8
วิธีการวัดความหนืด.....	8

บทที่ 3 ผลการวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล.....	1
ผลการวัดความหนาแน่น.....	1
ผลการวัดความหนืด.....	1
ลักษณะทางกายภาพของแป้งข้าวเจ้า.....	1
ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จาก เครื่องวัดความหนืด.....	2
ผลของค่าความหนืด.....	3
แบบสมการวิทยากระแสของแป้งโดข้าวเจ้า.....	7
ผลการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแป้งข้าวเจ้า.....	8
ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ใช้เพื่อการจำลองการไหล	11
ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิง	

วิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบ 9 18 และ 30 รอบต่อนาที.....	11
ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และ อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิง วิเคราะห์ของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว.....	13
ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูดชัน.....	15
ความดันที่ปรากฏในเนื้อแป้งข้าวเจ้า.....	15
ความเร็วและอัตราเฉือนที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า.....	21
อุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า.....	23
อัตราการไหลเชิงมวล.....	24
ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง.....	29
มิติของสกรูที่มีผลต่อความดัน.....	36
ตัวแปรไร้มิติ.....	37
 บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	1
บรรณานุกรม	1
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก สัญลักษณ์.....	1
ภาคผนวก ข มิติสกรู.....	3
ประวัติผู้วิจัย	1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรูที่ใช้ในโครงการวิจัย.....	2
ตารางที่ 3.1 ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าและแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จากเครื่องวัดความชื้น.....	2
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแป้งโดข้าวเจ้า.....	4
ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียด mesh element.....	9
ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ของผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9 18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C.....	13
ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายใกล้ทางออกแป้งข้าวเจ้าความชื้น 47 %.....	16
ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแป้งข้าวเจ้าความชื้น 54 %.....	17
ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแป้งข้าวเจ้าความชื้น 60 %	17
ตารางที่ 3.9 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %.....	25
ตารางที่ 3.10 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 54%.....	25
ตารางที่ 3.11 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %.....	26
ตารางที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้งโดความชื้น 54 %.....	30
ตารางที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้งโดความชื้น 40 %.....	31

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการเปรียบเทียบความดันเนื่องจากความลึกของช่อง ทางการไหล สำหรับ model12 และ model13	36
--	----



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การวิเคราะห์ระบบการไหล แบบปริมาตรควบคุมแบบเอลิเมนต์ขนาดเล็ก.....	7
รูปที่ 1.2 (a) แสดงลักษณะของสกรูและ barrel, (b) แสดงลักษณะของช่องทางการไหล ที่ถูกคลี่ออกและกำหนดให้อยู่ในระบบพิกัดฉาก.....	10
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการคำนวณแบบ coupled solution method ของ Fluent.....	17
รูปที่ 1.4 ตัวอย่างภาพปริมาตรควบคุมย่อยแบบสามเหลี่ยมที่ปรากฏใน Fluent	17
รูปที่ 2.1 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 1.....	2
รูปที่ 2.2 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 2.....	3
รูปที่ 2.3 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 3.....	3
รูปที่ 2.4 ภาพมิติของหัวคายนที่ใช้ในการทดลองและใช้สำหรับการจำลองของสกรู Model1....	4
รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งที่ใช้วัดความดัน.....	7
รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแป้งโคข้าวเจ้าสุกหลังผ่านกระบวนการวัดความหนืด.....	1
รูปที่ 3.2 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	6
รูปที่ 3.3 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	6
รูปที่ 3.4 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	7
รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทรูชัน Model 1 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	9
รูปที่ 3.6 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทรูชัน Model 2 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	10
รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทรูชัน Model 3 ณ ตำแหน่งปลายทางออก.....	10
รูปที่ 3.8 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9,18 และ30 รอบต่อ นาทีที่อุณหภูมิ 40 °C.....	12

รูปที่ 3.9 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว tangential ระหว่าง ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °.....	12
รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุน สกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
รูปที่ 3.11 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุน สกรู 30 รอบต่อนาที.....	14
รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองความดันที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	16
รูปที่ 3.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 47 % ความชื้นเปียก.....	18
รูปที่ 3.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 54 % ความชื้นเปียก.....	18
รูปที่ 3.15 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 60 % ความชื้นเปียก.....	19
รูปที่ 3.16 อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที.....	20
รูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	21
รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่ง 0.2027 m วัดจากตำแหน่งปลายทางออกหัวดา.....	22
รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทาง ออกของหัวดา.....	22
รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทาง ออกของหัวดาในลักษณะตัดขวางตัวสกรู.....	23

รูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองอนุหุมิที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีด โดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน.....	24
รูปที่ 3.22 แสดงอิทธิพลของอนุหุมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %ความชื้นเปียก.....	27
รูปที่ 3.23 แสดงอิทธิพลของอนุหุมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก.....	27
รูปที่ 3.24 แสดงอิทธิพลของอนุหุมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวล ของแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก.....	28
รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ความเร็ว รอบต่างๆ ที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ อนุหุมิ 105 องศาเซลเซียส.....	32
รูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนสกรูกับอัตราการไหลเชิงมวล และความดันของผลิตภัณฑ์ของ Model 2 และ Model 3 ตามลำดับ.....	37
รูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of drag flow (F^*_d) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมี ของปลอกสกรู (H/R_p).....	38
รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of pressure flow (F^*_p) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมี ของปลอกสกรู (H/R_p).....	38
รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับ ตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อนาที.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (reviewed literature)

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กระบวนการผลิตอาหารด้วยวิธี extrusion จัดว่าเป็นกระบวนการการผลิตที่ให้กำลังการผลิตและประสิทธิภาพสูงจึงได้รับความนิยมใช้กันแพร่หลายมากในภาคอุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการ extrusion เป็นทั้งตัวผสมและตัวทำให้อาหารสุกไปพร้อมกัน วัตถุประสงค์หลักที่เข้าสู่กระบวนการผลิตในรูปของของแข็งปนของเหลวจะผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นของไหลและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพเมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการจนกระทั่งแปรรูปกลับเป็นของแข็งอีกครั้งหลังออกจากหัวดายขึ้นรูปที่ปลายทางออกของเครื่องเอกซ์ทรูชันนี้ เป็นที่ทราบกันดีในกลุ่มของวิศวกรผู้ควบคุมระบบผลิตทางนี้ว่า การผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปทรงที่ต้องการและการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมือนกันนั้นถือว่าเป็นเรื่องค่อนข้างซับซ้อนซึ่งการผลิตโดยทั่วไปจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมระบบในการปรับแต่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตนับตั้งแต่ การกำหนดแบบการจัดเรียงตัวของสกรู การออกแบบหัวดายในกรณีของการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ การควบคุมปริมาณความร้อนหรืออุณหภูมิแต่ละย่านของเครื่องเอกซ์ทรูชัน และการปรับความเร็วรอบของการหมุนสกรู เป็นต้น สาเหตุของความซับซ้อนในการปรับค่าตัวแปรของเครื่องเอกซ์ทรูชันนี้เป็นเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบอาหารที่กลายสภาพเป็นสารประเภทกึ่งแข็งกึ่งเหลว (viscoelastic material) เมื่อได้รับความร้อนและพลังงานจากแรงเฉือนภายใต้กระบวนการ extrusion ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ (rheology properties) (Darby, 1976) แต่ข้อมูลการศึกษาเรื่องคุณสมบัติทาง rheology ของวัตถุดิบอาหารที่จำเป็นต่อการควบคุมเครื่องเอกซ์ทรูชันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปที่ต้องการยังมีไม่มากพอเนื่องจากข้อจำกัดหลายอย่างอันได้แก่ ข้อจำกัดด้านข้อมูลในเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบอาหารซึ่งจะเป็นค่าที่ต้องก็ต่อเมื่อเป็นการติดตามบันทึกค่าจากเครื่องมือวัดระหว่างกระบวนการผลิตจริง ข้อจำกัดเรื่องของเทคนิคการทำขยายส่วนข้อมูลการผลิตที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูชันขนาดย่อส่วนมาใช้กับกับเครื่องที่ใช้ในอุตสาหกรรมและที่สำคัญก็คือข้อจำกัดเรื่องความหลากหลายของส่วนประกอบที่ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารนั่นเอง ด้วยเหตุนี้ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตอาหารด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันนั้นต้องสิ้นเปลืองงบประมาณจำนวนมากสำหรับการทดสอบการผลิตอย่างสุ่มจนกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทั้งนี้วิธีการลดต้นทุนการผลิตในส่วนนี้สามารถทำได้โดยการลดจำนวนการทดลองสุ่มด้วยการตั้งค่าตัวแปรควบคุม

การผลิตเริ่มต้นโดยอาศัยผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องเอกซ์ทรูชันบนพื้นฐานความรู้ในเรื่อง computational fluid dynamics และ food rheology การใช้เทคนิคเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาทำนายพฤติกรรมของไหลที่เกิดขึ้นนี้กำลังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าสามารถใช้ช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้อย่างมากและช่วยให้การผลิตทำได้เร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ถึงแม้ว่าเทคนิคดังกล่าวนี้จะมีการวิจัยใช้ในอุตสาหกรรมหนักอื่นๆ มาพอสมควรแต่เพิ่งจะเข้ามามีบทบาทในแวดวงอุตสาหกรรมอาหารได้ไม่นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมีส่วนช่วยเสริมสร้างความเข้มแข็งให้กับอุตสาหกรรมอาหารในบ้านเราได้โดยลดการพึ่งพาเทคโนโลยีด้านนี้จากต่างประเทศลงและเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมอาหารในเมืองไทยให้เกิดเทคโนโลยีที่สามารถสร้างวิธีการควบคุมกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ หัดเทียบกับต่างประเทศ โครงการนี้จะช่วยวางรากฐานงานวิจัยให้สอดคล้องกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมโดยตรงและช่วยพัฒนางานการศึกษาในขอบเขตความรู้ด้านวิศวกรรมอาหาร

1.2 รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการใช้วิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของวัตถุดิบจำพวกวัสดุธรรมชาติในกรรมวิธีการผลิตโดยเครื่องเอกซ์ทรูชันทำโดยการวิเคราะห์ระบบสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่เขียนบนพื้นฐานของกฎทางฟิสิกส์เรื่องหลักการอนุรักษ์มวล กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันหรือการถ่ายโอน โหมดันต์ และหลักการอนุรักษ์พลังงานร่วมกับการใช้สมการตัวประกอบอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสัมพันธ์ให้เท่ากับจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและเพื่อทราบฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอันเนื่องมาจากปัจจัยควบคุมการผลิต สมการตัวประกอบที่เกี่ยวข้องนั้น ได้แก่ สมการความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อน สมการความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของความเค้นที่มีต่อการเปลี่ยนรูปและอัตราการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหาร (rheological constitutive equations) เป็นต้น (Kamal and Ryan, 1989) ความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้จะมีผลต่อการนำไปใช้ในการตั้งค่าตัวแปรควบคุมระบบผลิตให้มีประสิทธิภาพดีได้นั้นขึ้นกับตัวแปรสองเรื่องคือ หนึ่งเรื่องความถูกต้องของแบบสมการตัวประกอบ และเรื่องเทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เลือกมาประยุกต์ใช้ในงานคำนวณนั่นเอง

ความถูกต้องของแบบสมการตัวประกอบโดยเฉพาะในเรื่องของอัตราการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหารภายใต้อิทธิพลของความเค้นจัดว่าเป็นประเด็นสำคัญของงานคำนวณก็ด้วยว่ารูปแบบสมการตัวประกอบที่พัฒนาขึ้นมามีขีดจำกัดของการนำไปใช้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสมการตัวประกอบที่ใช้อธิบายคุณสมบัติเรื่องการไหลและการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหารขึ้นกับคุณสมบัติ

พื้นฐานของวัตถุดิบ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น คุณสมบัติทางความร้อน ซึ่งค่าของคุณสมบัติเหล่านี้จะแปรตามปัจจัยเรื่อง ความร้อน ความดัน แรงกระทำ การได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่ถูกต้องของวัตถุดิบอาหารเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นส่วนสำคัญมากของงานคำนวณที่จำเป็นต้องได้ค่าจากการทดลองจริงสำหรับส่วนผสมของวัตถุดิบที่ไม่เหมือนกันขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบอาหารเป็นที่ทราบกันว่ายังไม่มี การเก็บบันทึกรวบรวมเป็นข้อมูลที่มีความเชื่อถืออย่างเป็นระบบระเบียบ งานวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบสมการตัวประกอบเกี่ยวกับพฤติกรรมเรื่อง rheology ของวัตถุดิบอาหารทำบนพื้นฐานทฤษฎีควอนตัมและทฤษฎีทางโมเลกุลคล้ายกับแบบสมการที่ใช้สำหรับอธิบายการไหลของพอลิเมอร์เหล่านั้นเอง (Maddock 1974, Pearson 1976, Bird et al. 1987) หากแต่ว่าการประยุกต์วิธีนี้มาใช้กับวัตถุดิบอาหารที่นอกจากจะจัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนแล้วยังมีส่วนประกอบของวัตถุดิบหลากหลายตัวที่มีความแตกต่างกันในด้าน โมเลกุลและซับซ้อนมากกว่าในกรณีของส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสมเสียอีก สาเหตุนี้ทำให้การนำแบบสมการตัวประกอบที่มีการคิดกันขึ้นมาบ้างแล้วนั้นไปใช้ได้ค่อนข้างจำกัด ในย่านแรงเฉือนที่แบบสมการจะสามารถบรรยายการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหารได้อยู่ในช่วงที่เชื่อถือได้ แม้ว่างานวิจัยพัฒนาแบบสมการตัวประกอบสำหรับการไหลของวัตถุดิบอาหารจะเริ่มพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 70 (Remsen et al.1978, Cervone and Harper 1978, Harper 1981) ผลงานวิจัยมีไม่มากนักด้วยข้อจำกัดเรื่องเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ทำให้การตรวจ สอบความถูกต้องของแบบสมการทางการทดลองจริงไม่สามารถทำได้ดีนัก งานวิจัยและพัฒนาแบบสมการเรื่อง rheology นี้มาได้รับความสนใจกันอีกครั้งตั้งแต่ต้นคริสต์ศตวรรษที่ 90 เรื่อยมาเพราะเทคนิคงานวิจัยเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริงและเริ่มเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายทำให้การวิจัยตรวจสอบความถูกต้องของแบบสมการตัวประกอบทางอ้อมกระทำได้โดยการเปรียบเทียบความถูกต้องของพารามิเตอร์วัดพฤติกรรมการไหลที่ได้จากผลการคำนวณที่ใช้อาศัยแบบสมการตัวประกอบกับค่าจากมาตรวัดจริง เช่น อัตราการไหล ความเร็ว ความดัน เป็นต้น ประกอบกับความเร็วเรื่องการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้การจำลองการไหลทำได้รวดเร็วขึ้นมากด้วย (Bhattacharya and Hanna 1986, Morgan et al.1989, Mackey et al. 1990, Karwe and Jaluria 1990, Gopalakrishna and Jaluria 1992)

การจำลองพฤติกรรมการไหลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแรกเริ่มนั้นถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการผลิตด้วยวิธี extrusion เทคนิคการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขระยะแรกๆ นั้นยังมีขีดจำกัดด้านความเร็วในการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์และทฤษฎีเทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเองทำให้การคำนวณต้องทำโดยการลดรูปความซับซ้อนของปัญหาลง เช่น การ

สมมติให้การไหลเป็นแบบสองมิติและให้การไหลเป็นแบบการไหลเต็มรูปแบบผ่านช่องการไหลแบบช่องสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นรูปเรขาคณิตของตัวสกรูที่คล้ายตัวออก (Fenner ,1977) การพัฒนาแบบคำนวณได้ทำกันต่อเนื่องเพื่อหาคำตอบเรื่องการไหลของของไหลชนิดนอนนิวโทเนียนภายใต้อิทธิพลทางความร้อน (Elbirli and Lindt 1984, Lindt 1989, Karwe and Jaluria 1990) ตั้งแต่ช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 90 ที่คอมพิวเตอร์มีความเร็วด้านคำนวณเพิ่มขึ้นมากก็มีผลงานวิจัยที่น่าทึ่งวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีเชิงตัวเลขเรื่อง finite difference หรือ finite element หรือ finite volume มาเขียนโปรแกรมคำนวณแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลในกระบวนการ extrusion กันมากขึ้น อาทิ งานจำลองการหลอมของพลาสติก LDPE และ PVC ในส่วนหลอมละลายของเครื่องเอกซ์ทรูดชันด้วยวิธีทาง finite element (Thibault and Tanguy, 1994, Chang and Lin, 1995) งานพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมการไหลนี้ขยายผลต่อเนื่องไปอย่างรวดเร็วตามการพัฒนาด้านเครื่องคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ด้านการเขียนแบบทางวิศวกรรมที่มีศักยภาพสูงในการเขียนรูปชิ้นงานได้ตามแบบจริงอย่างถูกต้องซึ่งเคยถือเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการคำนวณของไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรูปทรงซับซ้อน เช่น ในกรณีของตัวสกรูนั่นเอง ทำให้การพัฒนาซอฟต์แวร์การคำนวณเรื่อง fluid dynamics พัฒนาไปได้โดยไม่มีข้อจำกัดเรื่องการขึ้นรูปเครื่องมือจนกระทั่งซอฟต์แวร์แบบจำลองการไหลปัจจุบันนี้สามารถทำการทำนายและจำลองการไหลของของไหลในรูปสามมิติผ่านตัวสกรูที่เป็นรูปทรงจริงไม่ต้องใช้เทคนิคการปรับรูปสิ่งกีดขวางหรือตัวพากรไหลให้ง่ายต่อการการคำนวณ ส่งผลให้การจำลองพฤติกรรมการไหลกระทำได้รวดเร็วขึ้นกว่าในอดีตมาก อาทิ งานวิจัยของ Syrjala (1999) ที่เสนอการจำลองการไหลของของไหลผ่านตัวสกรูแบบสามมิติและเสนอแบบคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นไปพร้อมกันด้วย งานวิจัยโดย Dhanasekharan and Kokini (2003) เรื่องการทำขยายส่วนเครื่อง single screw extruder ขนาดห้องปฏิบัติการที่ใช้สำหรับผลิตอาหารที่มีวัตถุดิบเป็นแป้งข้าวสาลีไปเป็นเครื่องขนาดจริงโดยอาศัยผลการจำลองพฤติกรรมการไหลและการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางของไหลที่ชื่อ Polyflow[®] งานวิจัยของผู้วิจัยทีมนี้เน้นในเรื่องของรูปทรงและขนาดของตัวสกรูและ screw barrel ว่ามีผลอย่างไรต่อค่า specific mechanical energy และ residence time distribution สำหรับกรณีของเครื่องมือที่ออกแบบโดยทำการขยายส่วนบนพื้นฐานของผลการคำนวณที่ได้จากเครื่องขนาดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองจริงว่าถูกต้องแล้ว ผลที่ได้นี้เป็นการทำนายการไหลแบบสามมิติโดยไม่มีการใช้เทคนิคการคล้ายตัวสกรู การจำลองพฤติกรรมการไหลและการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหาร ณ ขณะนี้มีการพัฒนางานวิจัยกันมากในเรื่องเทคนิคการคำนวณให้ได้ผลลัพธ์เร็วและมีความถูกต้องสูง กลุ่มผู้วิจัยพัฒนาเทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับงานประยุกต์ด้านนี้ เช่น กลุ่มของ Dr. Tanguy ที่ใช้เทคนิคที่เรียกว่า fictitious domain method ร่วมกับ adaptive mesh refinement มาติดตามการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านช่องว่างระหว่างตัวสกรูกับตัวครอบสกรูที่มีขนาดช่องว่างเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ขณะสกรูหมุนอันเนื่องมาจากอิทธิพลด้านรูปทรงของตัวสกรูนั่นเอง เทคนิคดังกล่าวนี้ช่วยย่นระยะเวลาการคำนวณพร้อมๆกันกับเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณพฤติกรรมการไหลขึ้น (Bertrand et al., 1997 and Bertrand et al., 2002) วิธี adaptive mesh refinement ถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับกันสูงในแวดวงผู้วิจัยเรื่องระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอยู่ขณะนี้

งานวิจัยเพื่อจำลองพฤติกรรมผสม การไหล และการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบอาหารในกระบวนการผลิตอาหารในเมืองไทยนั้นถือได้ว่ายังค่อนข้างใหม่ และกำลังได้รับการพัฒนาวิจัยเพื่อตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรม ผู้วิจัยจึงมีความเชื่อมั่นว่าการพัฒนางานวิจัยเรื่องการจำลองพฤติกรรมไหลของวัตถุดิบจำพวกแป้งในกระบวนการผลิตแบบ extrusion จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถด้านการผลิต และเป็นการช่วยส่งเสริมให้สามารถพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องในศาสตร์ด้านนี้ส่งผลให้เราทีมงานวิจัยให้เกื้อหนุนความรู้ด้านการจำลองพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของของไหลซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เพื่อตอบสนองความต้องการให้กับภาคอุตสาหกรรมผลิตอาหารบ้านเรา

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการ คือ การใช้แบบทำนายทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบอาหารจำพวกแป้งร่วมกับโปรแกรมคำนวณทาง Computational Fluid Dynamics มาสร้างแบบจำลองพฤติกรรมไหลของแป้งที่จัดเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian ที่เกิดในเครื่องเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้เข้าใจและสามารถประมาณการการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมไหลอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าของตัวแปรควบคุมกระบวนการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชันได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ปริมาณสัดส่วนของวัตถุดิบ ความร้อน หรือ อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่อง อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความเร็วรอบของเพลาสกรู ขนาดของหัวคาย และตัวแปรด้านรูปทรงทางเรขาคณิตของตัวสกรู การตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองพฤติกรรมไหลที่ได้ยืนยันขึ้น โดยการเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าจากผลการผลิตจริง

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

3.1 ทางด้านเศรษฐกิจ

ผลงานวิจัยนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายของการผลิตอาหารด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชัน การนำผลการทำนายพฤติกรรมไหลไปใช้ปรับค่าตัวแปรควบคุมการผลิตให้มีความแม่นยำขึ้นจะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทดลองผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปทรงที่ต้องการแบบลองผิดลองถูกลงได้มากเมื่อเทียบกับการทดลองจริง ทั้งนี้เพราะการผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันในอุตสาหกรรมนั้นมีกำลังการผลิตที่สูงมากจึงทำให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิบอาหารจำนวนมากถ้าเกิดความผิดพลาดขณะผลิต

3.2 ทางด้านวิชาการ

เนื่องจากงานวิจัยในเรื่องนี้จะเกี่ยวข้องกับการนำความรู้ในหลายสาขาวิชา ได้แก่ ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอาหาร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมเคมี และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มาสังเคราะห์ใช้ร่วมกันส่งผลให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ให้แก่แวดวงวิชาการ ที่สำคัญคือ งานวิจัยนี้สอดคล้องกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมการผลิตอาหารของบ้านเราซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตอาหารเลี้ยงประชากรโลกในอันดับต้นๆ งานวิจัยนี้ยังจะช่วยกระตุ้นความสนใจของนักวิจัยบ้านเราต่อการทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น อันจะก่อให้เกิดระบบการทำงานเป็นทีมที่เข้มแข็ง สร้างสรรค์สร้างให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้อย่างรวดเร็ว

4. หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

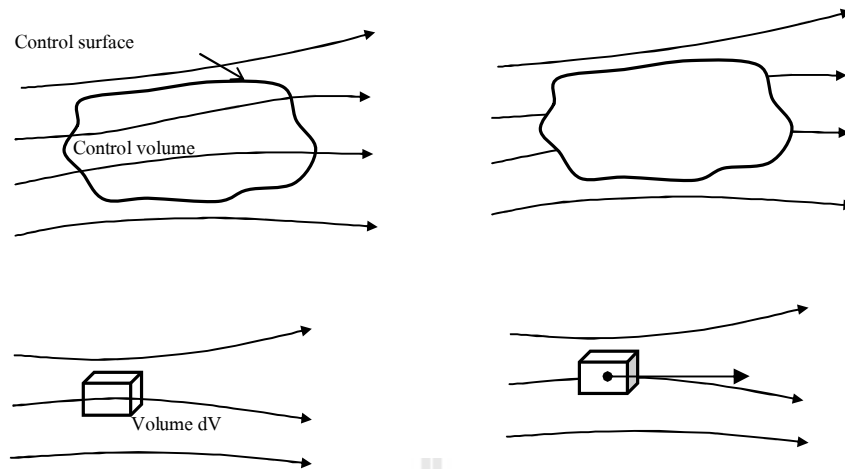
แนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องสกรูเอกซ์ทรูชันสำหรับงานทางการผลิตอาหารนี้เป็นเรื่องใหม่สำหรับเมืองไทย ประกอบกับนโยบายของรัฐบาลที่ส่งเสริมให้เมืองไทยเป็นครัวของโลก ทางผู้ผลิตอาหารส่วนใหญ่จึงสรรหาเครื่องมือที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษางานทางด้านนี้อย่างจริงจัง เพื่อต้องการนำประโยชน์จากงานวิจัยไปช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมทางการผลิตอาหารให้มีศักยภาพสูงมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องพึ่งพาความรู้จากบริษัทที่นำเข้าเครื่องมือส่งผลให้ประเทศสูญเสียเงินตราไปเป็นจำนวนไม่น้อยในแต่ละปี

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

5.1 สมการควบคุมการไหล

5.1.1 การวิเคราะห์การไหล

สมการควบคุมของการไหลมักถูกสร้างบนมูลฐานของ (1) *กฎอนุรักษ์มวล* ที่กล่าวว่ามวลย่อมไม่เพิ่มขึ้นหรือสูญหายไปจากระบบ (2) *กฎอนุรักษ์โมเมนตัม* ที่กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมย่อมเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน และ (3) *กฎอนุรักษ์พลังงาน* ที่กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานย่อมเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำกับปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของการไหล ซึ่งนำไปสู่กฎมูลฐานต่าง ๆ นั้น กระทำได้ 2 แบบ คือ แบบปริมาตรควบคุม (Control volume) และแบบเอลิเมนต์ขนาดเล็ก (Infinitesimal fluid element)



รูปที่ 1.1 การวิเคราะห์ระบบการไหล แบบปริมาตรควบคุม (รูปบน) แบบเอลิเมนต์ขนาดเล็ก (รูปล่าง) (Versteeg and Malalasekera., 1995)

การวิเคราะห์แบบปริมาตรควบคุม เป็นการพิจารณาให้ของไหลมีลักษณะเป็นก้อนหรือปริมาตรปิดที่เรียกว่าปริมาตรควบคุม (Control volume) ที่ถูกล้อมรอบด้วยผิวควบคุม (Control surface) ระบบปริมาตรควบคุมแบ่งย่อยตามลักษณะของการสังเกตการณ์ได้ 2 แบบ คือ แบบปริมาตรควบคุมหยุดนิ่ง โดยอนุภาคของไหลสามารถไหลผ่านเข้าออกผิวควบคุมได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ซ้ายบน) และแบบปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสนามการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1.1

(ขวาบน) สมการการไหลที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีปริมาตรควบคุมนี้จะอยู่ในรูปอินทิกรัล (Integral form) หากวิเคราะห์แบบปริมาตรควบคุมหยุดนิ่งจะได้ “สมการรูปแบบอนุรักษณ์ (Conservation form)” แต่หากวิเคราะห์แบบปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่จะได้ “สมการรูปแบบไม่อนุรักษณ์ (Non-conservation form)”

แบบเอลิเมนต์ขนาดเล็กมาก เป็นการพิจารณาให้ของไหลมีลักษณะเป็นก้อนเอลิเมนต์ขนาดเล็กมากในระดับอนุพันธ์ ขนาดที่เล็กมากของเอลิเมนต์ดังกล่าวไม่ได้หมายความว่ามีความระดับโมเลกุลของของไหล แต่เป็นขนาดที่ประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลของของไหลมากพอ อีกทั้งยังต้องคงคุณสมบัติความต่อเนื่องของเนื้อสารไว้ด้วย นอกจากนี้หลักฟิสิกส์มูลฐานที่ประยุกต์เข้ากับเอลิเมนต์ก็ใช้ได้กับเอลิเมนต์นั้นๆ เท่านั้น ไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของสนามการไหลได้ การวิเคราะห์แบบเอลิเมนต์ขนาดเล็กแบ่งได้ 2 แบบเช่นเดียวกับการวิเคราะห์แบบปริมาตรควบคุม คือ แบบเอลิเมนต์หยุดนิ่ง โดยให้อนุภาคของของไหลผ่านเข้าออกเอลิเมนต์ได้ รูปที่ 1.1 (ซ้ายล่าง) และแบบเอลิเมนต์เคลื่อนที่ไปพร้อมกับสนามการไหล รูปที่ 1.1 (ขวาล่าง) การวิเคราะห์แบบเอลิเมนต์ขนาดเล็กจะได้สมการการไหลในรูปอนุพันธ์ (Differential form) ซึ่งหากวิเคราะห์แบบเอลิเมนต์หยุดนิ่งก็จะ

ได้รูปสมการแบบอนุพันธ์ แต่หากวิเคราะห์แบบเอลิเมนต์เคลื่อนที่ก็จะได้รูปสมการแบบไม่อนุพันธ์ เช่นเดียวกับวิธีปริมาตรควบคุม

นอกจากการวิเคราะห์การไหลทั้ง 2 แบบดังกล่าวแล้วข้างต้นการวิเคราะห์การไหลยังต้องพิจารณาให้ของไหลเป็นสารต่อเนื่อง กล่าวคือ การไหลระดับมหภาค (Macroscopic scale) หรือระดับสัดส่วนที่ใหญ่กว่า μm ขึ้นไป ของไหลมักถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อต่อเนื่อง (Continuum) โดยจะไม่พิจารณาโครงสร้างและการเคลื่อนตัวของอนุภาคในระดับโมเลกุล เพราะถือว่าอนุภาคที่อยู่ภายในเอลิเมนต์มีขนาดเล็กมาก การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่ง จะไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยมากต่อคุณสมบัติระดับมหภาค ดังนั้น การพิจารณาจึงให้ความสำคัญพฤติกรรมและคุณสมบัติระดับมหภาคแทน เช่น ความเร็ว ความหนาแน่น อุณหภูมิ เป็นต้น

5.1.2 สมการอนุกรมวล

หากนำหลักการสังเกตแบบเอลิเมนต์หยุดนิ่งไปวิเคราะห์การไหลของมวล พบว่าการไหลของมวลสุทธิเข้าสู่เอลิเมนต์ มีค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในเอลิเมนต์ ข้อกล่าวนี้เป็นหลักการที่นำไปสู่กฎการอนุกรมวลหรือสมการของมวล ดังนี้

อัตราการเพิ่มของมวลในเอลิเมนต์ของของไหล = อัตราของมวลสุทธิที่ไหลเข้าสู่เอลิเมนต์

โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1-1)$$

สมการที่(1.1) เรียกว่าสมการอนุกรมวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ใน 3 มิติ สำหรับการไหลที่ขึ้นกับเวลา

โดย ρ = ความหนาแน่น, \vec{u} = ความเร็ว

5.1.3 สมการอนุกรมโมเมนตัม

สมการอนุกรมโมเมนตัมตั้งอยู่บนพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ที่กล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาคนั้นๆ”

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม = ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค

โดยมีสมการดังนี้คือ

$$-\nabla P + \nabla \cdot \tau = 0 \quad (1-2)$$

$$\tau = \eta \cdot (\nabla V + \nabla V^T) \quad (1-3)$$

โดย P = ความดัน, V = ความเร็ว, τ = stress, η = ความหนืดที่ปรากฏ

5.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมการพลังงานวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือ “อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนกับอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาค”

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน} &= \text{อัตราความร้อนสุทธิที่ให้กับอนุภาค} \\ &+ \text{อัตรางานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาค} \end{aligned}$$

โดยมีสมการดังนี้คือ

$$\rho C_p (V \cdot \nabla T) - \tau : \nabla V + \nabla \cdot q = 0 \quad (1-4)$$

โดย q = กระแสความร้อน, C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

5.2 วิชยากระแสของแป้ง

การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของแป้งโดยใช้ซอฟต์แวร์ด้านพลศาสตร์ของไหลจำเป็นต้องอาศัยค่าความหนืดของวัสดุ โดยแป้งเมื่อได้รับความชื้นในปริมาณมากพอแป้งจะมีลักษณะกึ่งเหลว กึ่งแข็งหรือลักษณะคล้ายของไหลมากขึ้นซึ่งเรียกว่า “โด” ดังนั้นเทคนิคการจำลองด้วยซอฟต์แวร์จะสมมติให้แป้งที่มีลักษณะที่เรียกว่า “โด” มีการไหลขณะถูกอัดตัวผ่านเครื่องเอกซ์ทรูชัน

นิยามค่าความหนืดของของไหลได้ถูกกำหนดไว้ว่าเป็นค่าความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล อันเกิดเนื่องมาจากการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของไหล ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือน โดยมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าความหนืดของแป้งในรูปแบบ “power law fluid model” ซึ่งมีสมการในรูปแบบ

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (1-5)$$

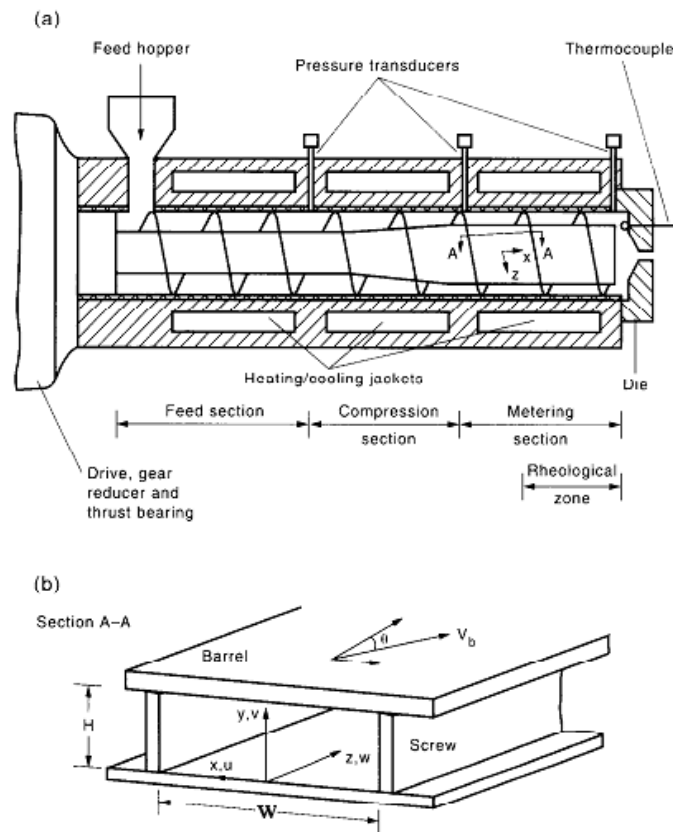
โดยที่ τ = ความเค้นเฉือน (shear stress) ในหน่วย Pa, $\dot{\gamma}$ = อัตราเฉือน (shear rate) ในหน่วย 1/s,

k = คำนีบ่งบอกค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค, n = คำนีบ่งบอกพฤติกรรมของไหล

5.3 สมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว

5.3.1 สมการสำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน

การสร้างสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการคลี่ช่องทางการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันให้อยู่ในระบบพิกัดฉากดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 (a) แสดงลักษณะของสกรูและ barrel, (b) แสดงลักษณะของช่องทางการไหลที่ถูกคลี่ออก และกำหนดให้อยู่ในระบบพิกัดฉาก (Karwe et.al.,1996)

โดยตั้งสมมติฐานให้ของไหลมีลักษณะคือ 1. การไหลเป็นแบบราบเรียบ 2. การไหลแบบอุณหภูมิคงที่ 3. ของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียนและอัดตัวไม่ได้ 4. ไม่คิดแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 5. การไหลเป็นแบบคงรูป 6. ไม่มีการลื่นไหลที่ผิวของสกรู จากเงื่อนไขดังกล่าว ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดฉากดังนี้

$$\text{ทิศทาง } z \quad \frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad (1-6)$$

$$\text{ทิศทาง } y \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \quad (1-7)$$

$$\text{ทิศทาง } x \quad \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (1-8)$$

โดยที่ x, y และ z คือระบบพิกัดของ channel width, channel depth และ down channel ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วน H/W มีค่าน้อยมากทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า $v_y \approx 0$ จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้ $\partial v_y / \partial x \approx 0, \partial v_x / \partial x \approx 0$ และ $\partial v_y / \partial y \approx 0$ ดังนั้นทำให้สามารถลดรูปสมการ (1-6) – (1-8) ได้คือ

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad (1-9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} \approx 0 \quad (1-10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \approx \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (1-11)$$

การหาผลเฉลยให้กับสมการ (1-9) จะกำหนดให้ barrel เป็นชิ้นส่วนหมุนและกำหนดให้สกรูหยุดนิ่ง (Rowell and Finlayson, 1928; Mckelvey, 1953; Middleman, 1977; Giffith, 1962; Choo et al., 1980; Campbell et al., 1992) โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

Barrel: $v_z(x, H) = R_s \omega \cos \phi_b,$

Screw root: $v_z(x, 0) = 0$

Screw flights: $v_z(0, y) = 0,$

$$v_z(W, y) = 0$$

จากเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ barrel หมุนและให้สกรูหยุดนิ่งนั้นเป็นเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่ถูกต้องตามลักษณะการทำงานจริงของเครื่องเอกซ์ทราซัน ซึ่งลักษณะจริงนั้นชิ้นส่วนที่หมุนคือสกรูและชิ้นส่วนที่หยุดนิ่งคือ barrel โดยความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยที่กำหนดให้ barrel หมุนและสกรูหยุดนิ่งถูกนำเสนอโดย Li and Hsieh (1994) นอกจากนั้น Li and Hsieh (1994) ได้นำเสนอสมการผลเฉลยที่กำหนดให้สกรูเป็นชิ้นส่วนหมุนและ barrel เป็นชิ้นส่วนหยุดนิ่ง เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวถูกต้องสอดคล้องตามลักษณะการทำงานจริงของเครื่องเอกซ์ทราซันทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\begin{aligned}
\text{Barrel:} & \quad v_z(x, H) = 0, \\
\text{Screw root:} & \quad v_z(x, 0) = R_s \omega \cos \phi_b, \\
\text{Screw flights:} & \quad v_z(0, y) = (R_s + y) \omega \cos \phi_b, \\
& \quad v_z(W, y) = (R_s + y) \omega \cos \phi_b
\end{aligned}$$

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวถูกใช้สำหรับหาผลเฉลยให้กับความเร็วของ down channel flow ซึ่งมีผลเฉลยดังสมการที่ (1-12)

$$v_z = R_s \omega \cos \phi_b f_{v1} + (2R_b - H) \omega \cos \phi_b f_{v2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \cdot (aW^2 f_{v3} + bH^2 f_{v4}) \quad (1-12)$$

โดยที่

$$f_{v1} = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{i\pi x}{W} \sinh \frac{i\pi(H-y)}{W}}{i \sinh \frac{i\pi H}{W}} \quad (1-13)$$

$$f_{v2} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{i\pi y}{H} \sinh \frac{i\pi(W-x)}{H} + \sinh \frac{i\pi x}{H}}{i \sinh \frac{i\pi W}{H}} \quad (1-14)$$

$$f_{v3} = \frac{4}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{i\pi x}{W} \left[\frac{\sinh \frac{i\pi(H-y)}{W} + \sinh \frac{i\pi y}{W}}{\sinh \frac{i\pi H}{W}} - 1 \right]}{i^3} \quad (1-15)$$

$$f_{v4} = \frac{4}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{i\pi y}{H} \left[\frac{\sinh \frac{i\pi(W-x)}{H} + \sinh \frac{i\pi x}{H}}{\sinh \frac{i\pi W}{H}} - 1 \right]}{i^3} \quad (1-16)$$

ค่าคงที่ a และ b ในสมการที่ (1-12) มีค่าขึ้นกับอัตราส่วน H/W ถ้าอัตราส่วน H/W มีค่าน้อยจะทำให้ได้ค่า $a = 0$ และ $b = 1$ แต่ถ้าอัตราส่วน H/W มีค่ามากจะทำให้ได้ค่า $a = 1$ และ $b = 0$ ตามลำดับ

สำหรับการคำนวณความเร็วให้กับ cross channel flow, v_x สามารถทำได้โดยหาปริพันธ์สองชั้นของสมการที่ (1-11) โดยได้ผลเฉลยดังนี้

$$v_x = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{y^2}{2\mu} + c_1 y + c_2 \quad (1-17)$$

ค่าคงที่ c_1 และ c_2 สามารถหาได้โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต $v_x(H) = 0$ และ $v_x(0) = -R_s \omega \sin \phi_b$ แทนค่าเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวลงในสมการที่ (1-17) ทำให้ได้สมการเพื่อหาค่า v_x ดังแสดงในสมการที่ (1-18)

$$v_x = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{(y^2 - Hy)}{2\mu} - R_s \omega \sin \phi_b \frac{H - y}{H} \quad (1-18)$$

ในสมการ (1-18) ปกติแล้วค่า $\partial P / \partial x$ มักเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นการประมาณค่าดังกล่าวสามารถทำได้โดยการหาปริพันธ์ของค่า v_x ตลอดทั่วทั้ง channel depth ดังนี้

$$\int_0^H v_x dy = -\frac{H^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{R_s \omega \sin \phi_b H}{2} = Q_{leakage} \quad (1-19)$$

ทำให้ได้สมการเพื่อประมาณค่า $\partial P / \partial x$ ดังสมการ (1-20)

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{12\mu}{H^3} \left[Q_{leakage} + \frac{R_s \omega \sin \phi_b H}{2} \right] \quad (1-20)$$

แทนค่า $\partial P / \partial x$ ลงในสมการ (1-18) ทำให้ได้สมการเพื่อหาค่า v_x ดังนี้

$$v_x = \frac{R_s \omega \sin \phi_b (H - y)}{H} \left[3 \frac{y}{H} - 1 \right] + \frac{6Q_{leakage} [Hy - y^2]}{H^3} \quad (1-21)$$

จากสมการ (1-21) หากทราบมิติของสกรูและค่า $Q_{leakage}$ ก็สามารถคำนวณหาค่าความเร็ว v_x ได้ โดยสามารถคำนวณค่า $Q_{leakage}$ ได้จาก Rauwendaal(1986, 1988) โดยมีสมการคือ

$$Q_{leakage} = \frac{\delta}{H} R_s \omega \sin \phi_b W_b H \quad (1-22)$$

ทำการรวมค่าความเร็วใน down channel flow , v_z และความเร็วใน cross channel flow, v_x จะทำให้ความเร็วในแนว axial , v_a และความเร็วในแนว tangential ซึ่งหาได้จากสมการ

$$v_a = v_z \sin \phi_b + v_x \cos \phi_b \quad (1-23)$$

$$v_t = v_z \cos \phi_b - v_x \sin \phi_b \quad (1-24)$$

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วในทิศทางต่างๆแล้วความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลก็เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากอีกปัจจัยหนึ่งสำหรับการออกแบบเครื่องเอกซ์ทริงชัน Li และ Hsieh (1994) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา

การไหลและความดัน สมการดังกล่าวถูกสร้างบนสมมติฐานที่ให้สกรูหมุนและ barrel หักหนึ่งโดยมีสมการดังนี้

$$Q_z = R_s \omega \cos \varphi_b W^2 f_{Q1} + (2R_b - H) \omega \cos \varphi_b H^2 f_{Q2} + \frac{a}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \left(W^4 f_{Q3} - \frac{W^3 H}{12} \right) + \frac{b}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \left(H^4 f_{Q4} - \frac{H^3 W}{12} \right) \quad (1-25)$$

โดยที่

$$f_{Q1} = \frac{8}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} \left[\frac{\cosh \frac{i\pi H}{W} - 1}{\sinh \frac{i\pi H}{W}} \right] \quad (1-26)$$

$$f_{Q2} = \frac{8}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} \left[\frac{\cosh \frac{i\pi W}{H} - 1}{\sinh \frac{i\pi W}{H}} \right] \quad (1-27)$$

$$f_{Q3} = \frac{16}{\pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \left[\frac{\cosh \frac{i\pi H}{W} - 1}{\sinh \frac{i\pi H}{W}} \right] \quad (1-28)$$

$$f_{Q4} = \frac{16}{\pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \left[\frac{\cosh \frac{i\pi W}{H} - 1}{\sinh \frac{i\pi W}{H}} \right] \quad (1-29)$$

5.3.2 สมการสำหรับของไหลแบบนอนนิวโทเนียน

สมการที่ (1-25) สามารถคำนวณอัตราการไหลได้เฉพาะของไหลแบบนิวโทเนียนเท่านั้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แปงโคข้าวเจ้าเป็นของไหลตัวอย่างซึ่งมีลักษณะการไหลแบบ power law fluid model ดังนั้นสมการที่ (1-25) จึงไม่สามารถใช้คำนวณอัตราการไหลได้ หากต้องการคำนวณอัตราการไหลจำเป็นต้องใช้สมการสำหรับของไหลแบบ power law fluid model โดยสมการดังกล่าวได้ถูกนำเสนอโดย Rauwendaal (2001) โดยมีสมการคือ

$$Q_z = \left(\frac{4+n}{10}\right) pWHv_{bz} - \left(\frac{1}{1+2n}\right) \frac{pWH^3(\partial P/\partial z)}{4\eta} \quad (1-30)$$

โดยที่

$$\eta = k \left(\frac{v_{bz}}{H}\right)^{n-1} \quad (1-31)$$

โดยค่า $\partial P/\partial Z$ ที่ใช้สำหรับการคำนวณในสมการที่ (1-12), (1-25) และ (1-30) ได้นำค่าจากผลการจำลองมาคำนวณและค่า $\partial P/\partial x$ ที่ใช้คำนวณในสมการที่ (1-18) ได้ใช้ค่าจากผลการจำลองมาคำนวณด้วยเช่นเดียวกัน

5.3.3 สมการคำนวณตัวแปรไร้มิติผลต่างความดัน และตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์

การคำนวณตัวแปรไร้มิติความดันและตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-32) และสมการ (1-33) ตามลำดับ สมการดังกล่าวถูกนำเสนอใน Li and Hsieh(1995) โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$Q_z^* = F_d^* - F_p^* P_z \quad (1-32)$$

และ

$$P_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \frac{H^2}{R_b \omega \cos \phi_b} \quad (1-33)$$

โดยที่

$$F_d^* = \frac{1-H/R_b}{H/R_b} \left[\frac{2\pi \tan \phi_b}{n_t} - \frac{e}{R_b} \right] f_{Q1} + \frac{0.271377272H/R_b(2-H/R_b)}{\left(\frac{2\pi \tan \phi_b}{n_t} - \frac{e}{R_b} \right) \cos \phi_b} \quad (1-34)$$

$$F_p^* = \frac{1}{12} - \frac{0.05252075H/R_b}{\left(\frac{2\pi \tan \phi_b}{n_t} - \frac{e}{R_b} \right) \cos \phi_b} \quad (1-35)$$

5.4 สมการคำนวณวิธีเชิงตัวเลขเพื่อการจำลองการไหล

การจำลองพฤติกรรมกรไหลของแปงโคในเครื่องเอกซ์ทรูชันของงานวิจัยนี้ทำโดยการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล Fluent 6.3.26 ซึ่งรายละเอียดพอสังเขปของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เลือกใช้ในการหาผลเฉลยของชุดสมการควบคุมการไหลของระบบดังกล่าวในหัวข้อก่อนหน้าสรุปหลักการได้ดังนี้

โปรแกรม Fluent ใช้เทคนิค control-volume หรือ finite-volume ในการแปลงชุดสมการควบคุมการไหลในรูปของสมการอินทิเกรตรอบปริมาตรปิดของระบบที่ต้องการวิเคราะห์พฤติกรรมกรไหล ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เป็นระบบสมการพีชคณิตเพื่อให้สามารถแก้ระบบสมการหาผลเฉลยได้โดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

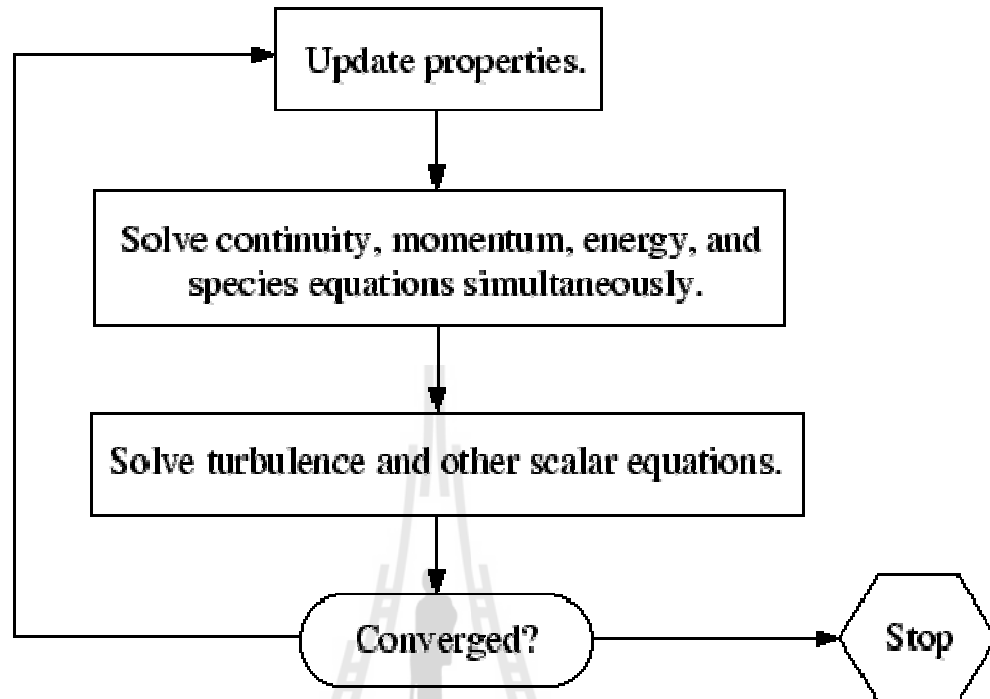
เทคนิค control-volume ประกอบด้วยการแบ่งปริมาตรรวมของระบบออกเป็นปริมาตรย่อยๆ จากนั้นใช้การอินทิเกรตสมการควบคุมระบบของแต่ละปริมาตรควบคุมย่อยหรือเป็นเทคนิครวมระบบสมการย่อยของแต่ละปริมาตรปิดที่ยังคงหลักการอนุรักษ์ปริมาณควบคุมระบบ การแบ่งปริมาตรควบคุมระบบออกเป็นปริมาตรย่อยเรียกว่าการทำ Discretization เพื่อให้สามารถใช้ชุดสมการควบคุมระบบของปริมาตรย่อยในการหาผลเฉลยของค่า ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และคุณสมบัติทางกายภาพให้กับสนามกรไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยเทคนิคการแก้สมการเชิงตัวเลข

กรรมวิธีที่เลือกใช้ในโปรแกรม Fluent เพื่อหาผลเฉลยให้กับชุดสมการควบคุมระบบของงานวิจัยนี้คือ coupled solution method ซึ่งมีขั้นตอนสรุปดังปรากฏในรูปที่ 1.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. คำนวณค่าคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลขึ้นกับผลเฉลยปัจจุบัน ในกรณีขั้นเริ่มต้นจะใช้ค่าผลเฉลยที่กำหนดไว้เพื่อการเริ่มคำนวณ

2. แก้ชุดสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และหรือพลังงานขึ้นกับสถานะที่ต้องใช้ และการถ่ายโอนอนุภาคไปพร้อมกัน โดยที่การคำนวณปริมาณสเกลาร์ตามสมการควบคุมค่าดังกล่าวทำเป็นลำดับแต่แยกออกจากชุดสมการควบคุมระบบที่ต้องใช้หาผลเฉลยไปพร้อมกัน เนื่องด้วยชุดสมการควบคุมระบบเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น และเป็นหลายสมการที่เกี่ยวข้องกันการแก้สมการหาผลเฉลยโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงต้องใช้ขั้นตอนคำนวณซ้ำหลายรอบจนกว่าจะได้ผลเฉลยที่ลู่เข้าสู่เกณฑ์วัดความถูกต้องของผลเฉลยที่กำหนดไว้เบื้องต้น

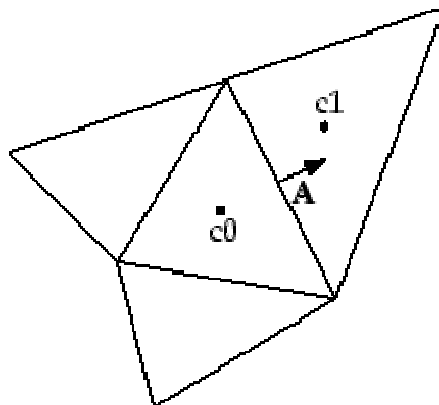
3. ตรวจสอบค่าผลเฉลยว่าเข้าสู่เกณฑ์ที่ระบุไว้หรือไม่ หากไม่เริ่มกระบวนการคำนวณต่อจนได้ตามเกณฑ์



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการคำนวณแบบ coupled solution method ของ Fluent

การทำ Discretization กับการถ่ายโอนปริมาณสเกลาร์ ϕ ซึ่งเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์ ณ สภาวะคงตัวได้ดังนี้

ภาพตัวอย่างการแบ่งโดเมนทั้งหมดของระบบที่ต้องการคำนวณพฤติกรรมการไหลออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยแบบสามเหลี่ยมหรือ cell ภายในโดเมนแสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างภาพปริมาตรควบคุมย่อยแบบสามเหลี่ยมที่ปรากฏใน Fluent

สมการอินทิเกรตการถ่ายโอนปริมาณสเกลาร์ ϕ ของแต่ละปริมาตรควบคุมย่อยหรือ cell ภายในโดเมนที่ต้องการคำนวณของระบบทั้งหมด คือ

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (1-36)$$

เมื่อให้ ϕ คือความหนาแน่น, \vec{v} คือเวกเตอร์ความเร็ว, \vec{A} คือเวกเตอร์พื้นผิว, Γ_ϕ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ϕ , $\nabla \phi$ คือเกรเดียนของ ϕ , S_ϕ คือ แหล่งของ ϕ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

การทำ discretization สมการ (1-33) ของแต่ละ cell ในโดเมน เช่นในกรณีของ 2 มิติโดยใช้เซลล์สามเหลี่ยมสมการ (1-33) จะเปลี่ยนรูปเป็นสมการ

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (1-37)$$

เมื่อให้ N_{faces} คือจำนวนหน้า (faces) ภายใน cell, ϕ_f คือค่า ϕ ที่แพร่ผ่าน cell, $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ คือฟลักซ์ของมวลที่ไหลผ่านหน้า, \vec{A}_f คือพื้นที่ของหน้า f (สำหรับ 2D $|A| = |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$), $(\nabla \phi)_n$ คือขนาดของเกรเดียนของ ϕ ตั้งฉากกับหน้า f , V คือ ปริมาตรของ cell

ระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้สมการ (1-37) จำเป็นต้องทราบค่า ϕ_f ซึ่งประมาณได้จากปริมาณที่ปรากฏอยู่ใน upstream cell หรือ upwind โดยมองสัมพันธ์กับทิศ v_n ในสมการ วิธีที่ใช้ได้ Fluent มีไว้ให้เลือกหลายสกริม ได้แก่ first-order upwind, second-order upwind, power law, และ QUICK

การทำ Discretization ให้กับสมการการถ่ายโอนโมเมนตัม

การทำ discretization ให้กับสมการ โมเมนตัมทำเหมือนกับการถ่ายโอนปริมาณสเกลาร์ที่กล่าวในย่อหน้าก่อนหน้า เช่น สมการ x-momentum ทำโดยให้ตัวแปร $\phi = u$

$$apu = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (1-38)$$

ในกรณีที่ทราบค่า pressure field และ face mass flux สมการ (1-38) สามารถใช้หาค่า velocity field ได้เหมือนวิธีการแก้สมการ 1-2 ที่กล่าวไว้ก่อนหน้า อย่างไรก็ตามค่า pressure field และ face mass flux เป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนหน้าและต้องได้ค่ามาเป็นส่วนหนึ่งของผลเฉลยเทคนิคที่ Fluent ใช้ในการหาผลเฉลยเรียกว่า co-located scheme ในการเก็บค่าความดันและความเร็วไว้ที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ แต่สมการ (1-38) ต้องการค่าความดันที่แบ่งหน้า C0 และ C1 ดังรูปที่ 1.4

ดังนั้นวิธีการเทียบหาค่าความดันจึงจำเป็นต้องใช้เพื่อหาค่าความดันที่หน้าทั้งสองจากค่าความดันของเซลล์

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ Fluent มีให้ใช้เป็นวิธีการเทียบหาค่าความดันเป็นวิธีมาตรฐานคือ การเทียบหาค่าจากสัมประสิทธิ์ของสมการโมเมนต์ ซึ่งใช้ได้กรณีที่ค่าความดันที่ face ไม่เปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันจากที่จุดศูนย์กลางเซลล์อันเป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดโมเมนต์ ข้อสังเกตในกรณีที่มีปัญหาคือจะพบว่าค่าความเร็วที่เซลล์มีค่าทำนายที่แตกต่างกันรุนแรง (overshoot หรือ undershoot) นอกจากนี้วิธีมาตรฐานที่ใช้ประมาณค่าความดันยังไม่เหมาะกับกรณีของการไหลที่เกิดจากแรงปริมาณสูงเนื่องจากการไหลวน (swirling flow) หรือกรณีของค่า Re สูง แต่อาจแก้ไขโดยใช้การสร้าง mesh ให้ละเอียดที่บริเวณดังกล่าว ตัวเลือกสกรีมอื่นที่ Fluent มีให้ใช้ในการประมาณค่าความดันคือ linear scheme, second-order scheme, body-force-weight scheme, PRESTO scheme

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าการใช้สมการโมเมนต์โดยวิธี first-order upwind ร่วมกับการใช้วิธีการประมาณค่าความดันแบบวิธีมาตรฐานให้ความถูกต้องของผลเฉลย

First-Order Upwind Scheme

หากเลือกใช้ First-Order Upwind Scheme ปริมาณของผิวเซลล์จะถูกพิจารณาโดยกำหนดให้ใช้ค่าเฉลี่ยที่จุดศูนย์กลางเซลล์และใช้ค่าดังกล่าวตลอดทั่วทั้งเซลล์ ดังนั้นปริมาณผิวเซลล์จึงมีจำนวนเท่ากับปริมาณเซลล์ เมื่อเลือกใช้ First-Order Upwind Scheme ค่า ϕ_f จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าที่จุดศูนย์กลางเซลล์ ϕ

การทำ Discretization ให้กับสมการการอนุรักษ์มวล

การการทำ Discretization ให้กับสมการการอนุรักษ์มวลเป็นการสร้างแปลงสมการอนุรักษ์มวลที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต ซึ่งมีขั้นตอนทั่วไปดังนี้

1. การแบ่งโดเมนของระบบออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยโดยอาศัยการสร้าง grid
2. การอินทิเกรตชุดสมการควบคุมระบบของแต่ละปริมาตรควบคุมย่อยเพื่อสร้างชุดสมการพีชคณิตสำหรับหาค่าตัวแปรตามไม่ทราบค่าแบบแยกส่วน ได้แก่ ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และ ตัวแปรสเกล่า โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (1-36)

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f \quad (1-39)$$

โดย J_f คือ mass flux ที่ไหลผ่านผิว f

3. การเปลี่ยนชุดสมการพีชคณิตจากข้อสองเป็นระบบสมการพีชคณิตเชิงเส้นแบบแยกส่วนเพื่อหาผลเฉลยให้กับตัวแปรตามที่ไม่ทราบค่า

รูปแบบสมการเชิงเส้นของสมการไม่ต่อเนื่อง

ค่าสเกลาร์ที่ถูก discretized จากสมการการส่งถ่ายประกอบไปด้วยตัวแปรสเกลาร์ที่ไม่ทราบค่าที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเซลล์และค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของเซลล์ที่อยู่รอบๆ โดยทั่วไปสมการที่ได้จะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นเชิงเส้น การทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการที่มีรูปเป็นเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1-40)

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (1-40)$$

เมื่อ ตัวห้อย nb อ้างอิงถึงเซลล์ที่อยู่ข้างๆ ค่า a_p และ a_{nb} คือสัมประสิทธิ์ความเป็นเชิงเส้นของค่า ϕ และค่า ϕ_{nb} ตามลำดับ

Under Relaxation

เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของชุดสมการที่ถูกแก้โดยโปรแกรม Fluent ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่า ϕ การแก้ปัญหาดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้ค่า Under Relaxation โดยที่ Under Relaxation จะช่วยลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า ϕ ในระหว่างรอบการคำนวณซ้ำใดๆ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า ϕ มีสมการดังนี้

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (1-41)$$

โดยที่ ϕ คือผลการคำนวณในรอบปัจจุบันของตัวแปรใดๆ, ϕ_{old} คือค่าของตัวแปรของรอบการคำนวณที่ผ่านมา, $\Delta \phi$ คือ ผลต่างของการคำนวณ และ α คือ Under Relaxation

การประมาณค่าของอนุพันธ์

ค่าอนุพันธ์ $\nabla \phi$ ของตัวแปร ϕ ถูก discretize เข้าสู่เทอมการพาและการแพร่ของสมการการเคลื่อนที่ ค่าดังกล่าวถูกคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Green-Gauss โดยมีสมการดังนี้คือ

$$(\nabla \phi)_{c_0} = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\phi}_f \vec{A}_f \quad (1-42)$$

โดยที่ $\bar{\phi}_f$ คือค่าของ ϕ ที่ตำแหน่ง cell face centroid โดยมีวิธีการประมาณค่าดังต่อไปนี้

Cell-Based Derivative Evaluation

โดยปกติค่า $\bar{\phi}_f$ ในสมการที่ (1-42) จะใช้ค่าเฉลี่ยของค่าจุดศูนย์กลางของเซลล์ที่อยู่ข้างๆ ดังสมการ

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{c_0} + \phi_{c_1}}{2} \quad (1-43)$$

Node-Based Derivative Evaluation

อีกทางเลือกสำหรับการคำนวณค่า $\bar{\phi}_f$ คือเลือกใช้วิธี Node-Based Derivative Evaluation โดยวิธีนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยของ node บน face ใด โดยมีสมการดังนี้

$$\bar{\phi}_f = \frac{1}{N_f} \sum_n^{N_f} \phi_n \quad (1-44)$$

โดยที่ N_f คือจำนวนของ nodes บน face เป็นที่ทราบกันดีว่าวิธี Node-Based จะให้ความถูกต้องสูงกว่าวิธีการ Cell-Based สำหรับ mesh แบบไร้โครงสร้าง การใช้งานตัวเลือกนี้ทำได้โดยเลือก Node-Based ภายใต้ Gradient Option ใน Solver panel ของ Fluent

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดัน

การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็ว สามารถทำได้โดยสร้างสมการให้กับสมการความดัน โดย Fluent ได้เตรียมอัลกอริทึมสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็ว จำนวน 4 อัลกอริทึมประกอบไปด้วย อัลกอริทึม SIMPLE, SIMPLEC, PISO และ Coupled โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ SIMPLE อัลกอริทึมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็ว SIMPLE อัลกอริทึมจะถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันโดยหลักการของขั้นตอนวิธีนี้อาศัยการสมมุติค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรต่างๆ ในสนามการไหล จากนั้นค่าที่สมมุติจะได้รับการปรับแก้ไขค่าให้ความถูกต้องขึ้นในระหว่างรอบการคำนวณซ้ำ

The Coupled Solver

สมการควบคุมในรูปเวกเตอร์

ระบบสมการควบคุมสำหรับส่วนประกอบของไหลเดี่ยว เขียนเพื่ออธิบายคุณสมบัติการไหลเฉลี่ยในกรณีรวมรูป สำหรับระบบพิกัดฉากของปริมาตรควบคุม V ใดๆต่ออนุพันธ์ของพื้นผิว dA สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV \quad (1-45)$$

เมื่อเวกเตอร์ \mathbf{W}, \mathbf{F} และ \mathbf{G} คือ

$$\mathbf{W} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \rho v u + p \hat{\mathbf{i}} \\ \rho v v + p \hat{\mathbf{j}} \\ \rho v w + p \hat{\mathbf{k}} \\ \rho v E + p \mathbf{v} \end{Bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + \mathbf{q} \end{Bmatrix} \quad (1-46)$$

และ \mathbf{H} คือ source terms เช่น แรงเนื่องจากน้ำหนักและพลังงาน

ρ, \mathbf{v}, E และ p คือความหนาแน่น, ความเร็ว, พลังงานรวมต่อหนึ่งหน่วยมวลและความดันของของไหลตามลำดับ, τ คือ viscous stress tensor และ \mathbf{q} คือ ฟลักซ์ความร้อน พลังงานรวม E มีความสัมพันธ์กับค่าเอนทัลปี H คือ

$$E = H - p / \rho \quad (1-47)$$

โดย
$$H = h + |\mathbf{v}|^2 / 2 \quad (1-48)$$

สมการนาเวียร์-สโตก ที่ปรากฏในสมการที่ (1-45) มีค่าตัวเลขที่มั่นคงมากเมื่อค่าตัวเลขมีค่าน้อยๆ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากผลต่างระหว่างความเร็วของของไหล \mathbf{v} และความเร็วเสียง ผลดังกล่าวมีผลกระทบต่อของไหลแบบอัดตัวไม่ได้เพราะไม่ได้คำนึงถึงความเร็วของของไหลเนื่องจากความเร็ว

เสียงนั้นมีค่าไม่จำกัด ผลจากความคงตัวของตัวเลขในสมการดังกล่าวทำให้การลู่เข้าหาผลเฉลยเกิดความล่าช้า โปรแกรม Fluent ได้ทำการแก้ไขความยุ่งยากดังกล่าวด้วยการแก้สมการแบบคู่ (coupled solver) โดยวิธีการดังกล่าวถูกเรียกว่า time-derivative preconditioning

Preconditioning

Time-derivative preconditioning จะทำการปรับแก้เทอมอนุพันธ์เวลาในสมการ (1-45) โดยคุณตัวเองด้วย preconditioning matrix ซึ่งทำให้เกิดการลดขนาดของความเร็วเสียงของระบบสมการที่สร้างขึ้นเพื่อบรรเทาความคงตัวของตัวเลขที่ปรากฏในระบบที่มีตัวเลขมีค่าน้อยและของไหลแบบอัดตัวไม่ได้

การ preconditioning เริ่มต้นโดยเริ่ม โดยการเปลี่ยนตัวแปรในสมการ (1-45) จากปริมาณอนุพันธ์ W เป็นตัวแปรดั้งเดิม Q โดยใช้กฎลูกโซ่ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV \quad (1-49)$$

เมื่อ Q คือ เวกเตอร์ $\{p, u, v, w, T\}^T$ และ Jacobian $\partial W / \partial Q$ คือ

$$\frac{\partial W}{\partial Q} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_T H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix} \quad (1-50)$$

โดยที่

$$\rho_p = \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_T, \rho_T = \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \quad (1-51)$$

โดย $\delta = 1$ ถูกใช้สำหรับก๊าซอุดมคติ และ $\delta = 0$ ใช้สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้

ทำการ precondition ระบบโดยทำการเปลี่ยน Jacobian matrix $\partial W / \partial Q$ ด้วย preconditioning matrix Γ เพื่อให้ระบบอยู่ในรูปอยู่ในรูปแบบอนุพันธ์ ซึ่งมีสมการคือ

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV \quad (1-52)$$

โดยที่

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Theta & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \Theta u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \Theta v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \Theta w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \Theta H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix} \quad (1-53)$$

เมื่อ
$$\Theta = \left(\frac{1}{U_r^2} - \frac{\rho_T}{\rho C_p} \right) \quad (1-51)$$

ผลลัพธ์ค่าเจาะจงของระบบที่ถูก precondition กำหนดมีค่าดังนี้

$$u, u, u, u' + c', u' - c' \quad (1-54)$$

โดยที่

$$u = \mathbf{v} \cdot \hat{n}$$

$$u' = u(1 - \alpha)$$

$$c' = \sqrt{\alpha^2 u^2 + U_r^2}$$

$$\alpha = (1 - \beta U_r^2) / 2$$

$$\beta = \left(\rho_p + \frac{\rho_T}{\rho C_p} \right)$$

สำหรับก๊าซอุดมคติ $\beta = (\gamma RT)^{-1} = 1/c^2$ เมื่อค่า $U_r = c$ ที่ความเร็วเสียงระดับ sonic หรือสูงกว่า, $\alpha = 0$ และค่าเจาะจงของระบบ precondition จะอยู่ในรูป $u \pm c$ แต่ที่ความเร็วเสียงต่ำจะทำให้ค่า U_r เข้าใกล้ 0 และค่า α เข้าใกล้ $1/2$ และค่าเจาะจงของระบบ precondition จะมีค่าเหมือนกันกับค่า u สำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นคงตัวหรือของไหลที่อัดตัวไม่ได้ค่า $\beta = 0, \alpha = 1/2$ และไม่คำนึงถึงค่า U_r .

Time Marching for Steady-State Flows

ชุด coupled ของสมการควบคุมในโปรแกรม Fluent ถูกแสดงทั้งในระบบคงตัวและไม่คงตัว ในกรณีที่เป็นระบบคงตัว ถูกตั้งสมมติฐานว่า Time Marching ดำเนินการจนกระทั่งเข้าใกล้ผลเฉลย

ที่สภาวะคงตัว การแปลงชุดสมการ coupled สามารถทำได้โดยใช้ระเบียบวิธี implicit หรือวิธี explicit โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธี implicit โดยมีรายละเอียดดังนี้

Implicit Scheme

ในระเบียบวิธี Implicit การแปลง Euler implicit ของสมการควบคุมจะถูกรวมเข้ากับ Newton-type linearization โดยทำให้เกิดระบบสมการเส้นตรงที่อยู่ในรูปแบบ delta ดังนี้

$$\left[D + \sum_j^{N_{faces}} S_{j,k} \right] \Delta \mathbf{Q}^{n+1} = -\mathbf{R}^n \quad (1-55)$$

เมื่อ

$$D = \frac{V}{\Delta t} \Gamma + \sum_j^{N_{face}} S_{j,i} \quad (1-56)$$

$$S_{j,k} = \left(\frac{\partial \mathbf{F}_j}{\partial \mathbf{Q}_k} - \frac{\partial \mathbf{G}_j}{\partial \mathbf{Q}_k} \right) \quad (1-57)$$

สมการที่ (1-55) สามารถแก้ได้โดยใช้ระเบียบวิธี AMG

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมรายละเอียดของขอบเขตการทดลองที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของโครงการวิจัยนี้ และระเบียบวิธีวิจัยทั้งหมดที่ประยุกต์ใช้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยกล่าวแสดงในหัวข้อหลักได้แก่ กรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโด กรรมวิธีที่ใช้ในการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง กรรมวิธีการทดลอง และเทคนิคการประมวลผลการจำลองเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่สะดวกต่อการใช้เพื่อกำหนดค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร

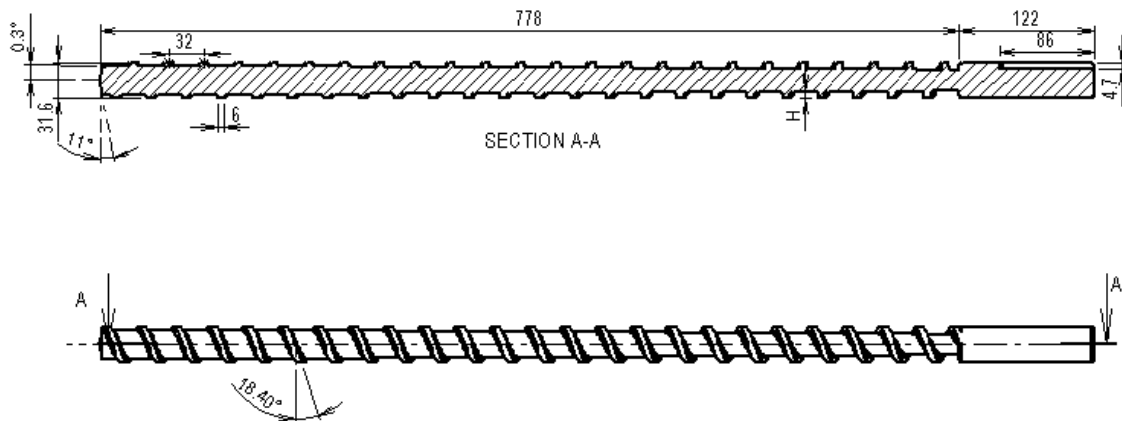
2.1 มิติและรายละเอียดของสกรู

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันกำหนดขอบเขตของงานศึกษาวิจัยเฉพาะให้กับกระบวนการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้าด้วยการใช้เครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว โดยการจำลองและการทดลองเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรหลักที่ใช้ควบคุมกระบวนการแปรรูปใช้แบบสกรูเดี่ยวของเครื่อง Betol รุ่น BC 32 โดยใช้หัวคายนแบบช่องทางไหลออกเดี่ยวซึ่งในที่นี้ใช้ชื่อเรียกเป็น แบบสกรู Model 1 ดังที่มีรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ส่วนงานศึกษาวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของมิติตัวสกรู โดยเฉพาะอัตราส่วนค่าความลึกของช่องการไหล (channel depth ratio, D:H) ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของแป้งโดระหว่างกระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันใช้แบบสกรูจำลอง โดยมีแบบหัวคายนแบบสี่ช่องทางไหลออกซึ่งในที่นี้ใช้ชื่อเรียกเป็นแบบสกรู Model 2 และ Model 3 ดังที่มีรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรูทั้งสองชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 เช่นกัน ทั้งนี้ภาพเขียนแบบวิศวกรรมของแบบสกรูทั้งสามได้แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ข สำหรับมิติของหัวคายนที่ใช้สำหรับการทดลองและใช้สำหรับการจำลองสำหรับสกรู Model 1 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.4

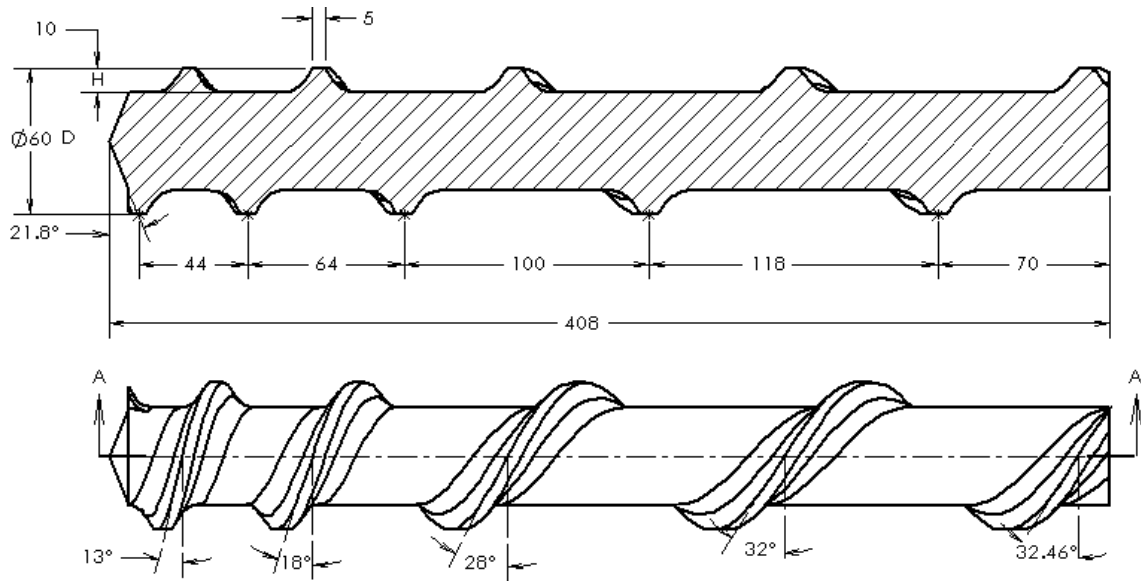
ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรูที่ใช้ในโครงการวิจัย

Model 1		Model 2		Model 3	
ตัวแปรมิติ	ขนาด	ตัวแปรมิติ	ขนาด	ตัวแปรมิติ	ขนาด
L/D	24.62	L/D	6.8	L/D	6.8
D	31.6 mm.	D	60 mm.	D	60 mm
Vary D/H	5 – 15.8	D/H	6	D/H	4
Helix angle	18.4°	Vary Helix angle	14.32 – 33.8°	Vary Helix angle	14.32 – 33.8°

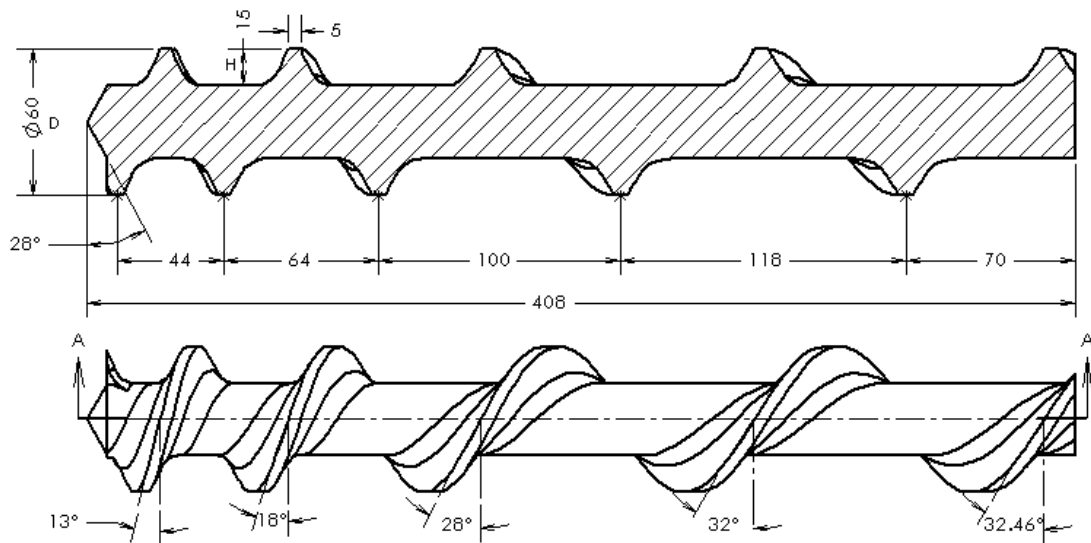
L = ความยาวสกรู, D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางสกรู, H = ความลึกช่องทางการไหล



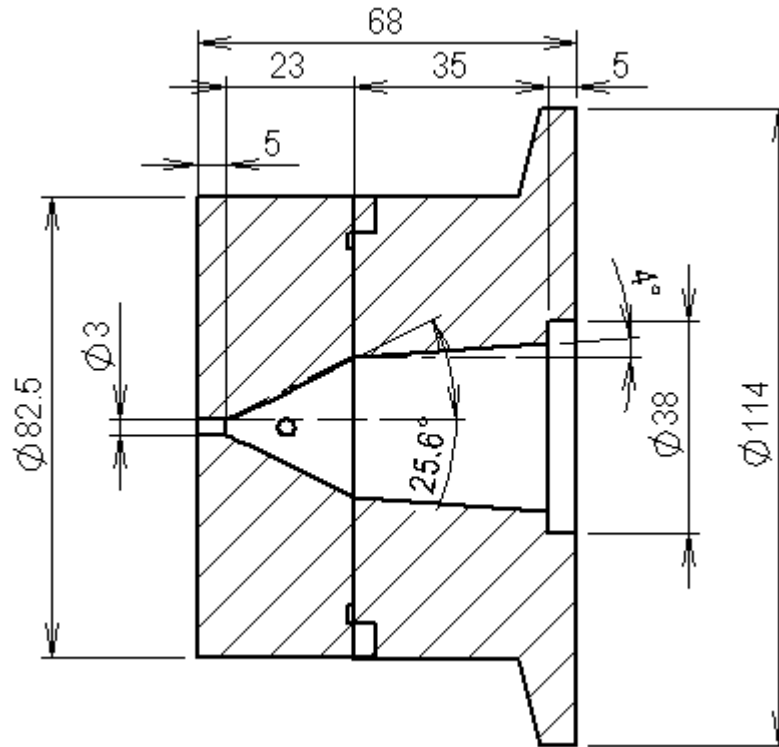
รูปที่ 2.1 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 1



รูปที่ 2.2 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 2



รูปที่ 2.3 ภาพประกอบแสดงรายละเอียดโดยสรุปด้านมิติของแบบสกรู Model 3



รูปที่ 2.4 ภาพมิติของหัวตายที่ใช้ในการทดลองและใช้สำหรับการจำลองของสกรู Model1

2.2 กรรมวิธีการสร้าง Mesh Element

การสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแปรงโด้เข้าภายในเครื่องเอกซทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวกระทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ Gambit 2.4.6 โดยสร้าง mesh element ครอบคลุมตลอดความยาวของสกรู mesh element ที่สร้างเป็นแบบ 3D Unstructured Meshes ซึ่งประกอบไปด้วย mesh element ชนิด hexahedra และ tetrahedral

2.3 กรรมวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลของแปรงโด้เข้าในเครื่องเอกซทรูชัน

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแปรงโด้เข้าภายในเครื่องเอกซทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวกระทำโดยประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์คำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent 6.3.26 ทำการจำลองภายใต้สภาวะการผลิตแบบอุณหภูมิคงตัว (Isothermal) และกระบวนการไหลแบบไม่อัดตัวในสภาวะคงตัว (Steady state-incompressible flow) โดยมีรายละเอียดการจำลองดังนี้

2.3.1 Solver Module และ Solver Control

การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของแปรงโด้เข้าใช้ Solver Module ชนิด 3d, pressure-based, laminar และใช้ Solver control ดังนี้

Relaxation

<i>Variable</i>	<i>Relaxation Factor</i>
Pressure	0.3
Density	0.9
Body Forces	1
Momentum	0.4
Energy	0.9

Pressure-Velocity Coupling

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
Type	SIMPLE

Discretization Scheme

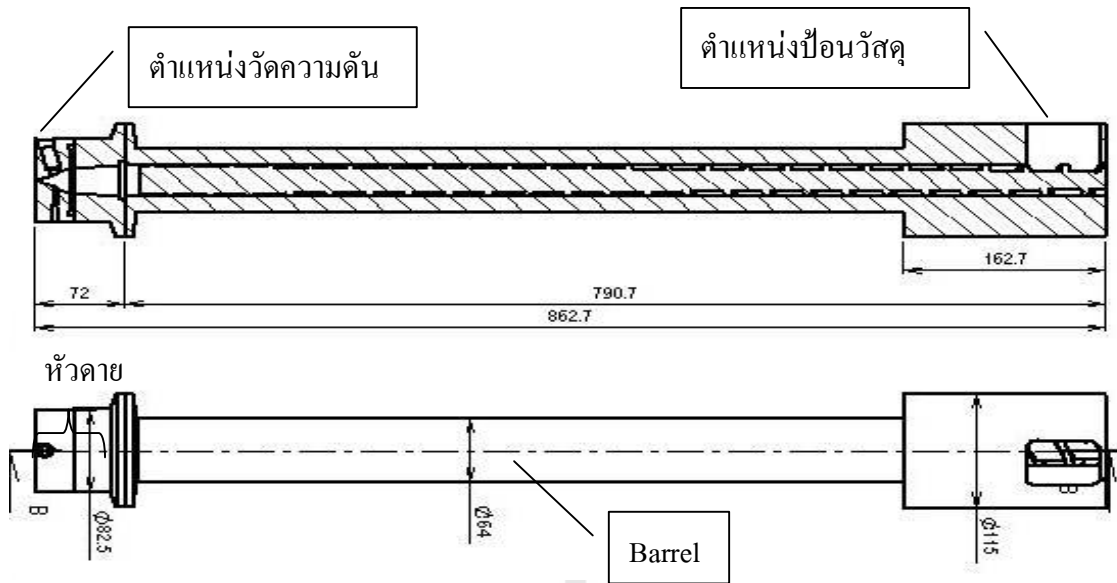
<i>Variable</i>	<i>Scheme</i>
Pressure	Standard
Momentum	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind

2.4 กรรมวิธีตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนเซลล์ที่สร้างเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้าวเจ้าในเครื่องเอกซทรวงูชัน

การตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนเซลล์ที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลกระทำโดยเปรียบเทียบผลของความดันจากผลการจำลองกับผลจากการทดลองและเปรียบเทียบผลการคำนวณจากการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์โดย Li and Hsieh (1995) ซึ่งทำการสร้างสมการเพื่อหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ให้กับการไหลของของไหลภายในเครื่องเอกซทรวงูชันชนิดสกรูเดี่ยวโดยกำหนดให้สกรูหมุนและ barrel หยุดนิ่ง ซึ่งตรงตามสภาวะการทำงานจริงของเครื่องเอกซทรวงูชันรวมถึงสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ กล่าวคืองานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโดยกำหนดให้สกรูเป็นชิ้นส่วนหมุนและกำหนดให้ barrel เป็นชิ้นส่วนที่หยุดนิ่ง

Li and Hsieh (1995) ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองของ Choo et al.,(1980) โดย Choo et al. ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนในเครื่องเอกซทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว โดยเลือกใช้น้ำเชื่อมข้าวโพดเป็นของไหลในการทดลองซึ่งมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้ ความหนาแน่นเท่ากับ 1390 kg/m^3 ความหนืดเท่ากับ 1287 Pa.s ค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 2722 J/kg.k และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.35 W/m.k ทำการทดลองแบบอุณหภูมิคงตัวที่ 40 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบหมุนสกรูเท่ากับ 9,18,27 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Choo et al., (1980) เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสำหรับแป้งโดข้าวเจ้าซึ่งเป็นของไหลแบบนอนนิวโทเนียนโดยกำหนดให้ของไหลมีค่าความหนืดคงตัวเท่ากับ 43625.5 Pa.s และทำการจำลองที่ความเร็วรอบหมุนสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิคงตัวที่ 105 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบผลการจำลองว่าสามารถติดตามพฤติกรรมการอัดตัวที่มีค่าความหนืดสูงได้หรือไม่ โดยผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) เช่นเดียวกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วย ความเร็วเชิงเส้นในแนว axial และอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์(อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางออกหัวคาย) นอกเหนือจากการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพดและแป้งโดข้าวเจ้าที่ค่าความหนืดคงตัวแล้วผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับแป้งโดข้าวเจ้าที่มีลักษณะแบบ power law fluid model โดยทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลจากผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ที่ความเร็วรอบหมุน สกรู 10,20,30 และ 40 รอบต่อนาทีตามลำดับ ความชื้น 54 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นเปียกและอุณหภูมิคงตัวที่ 105 องศาเซลเซียส โดยมีค่า $k = 1643.97$ และค่า $n = 0.3044$

สำหรับวิธีการทดลองกระทำโดยเตรียมแป้งข้าวเจ้าที่เปอร์เซ็นต์ความชื้น 54 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นเปียก นำแป้งที่เตรียมไว้ทำการทดลองการอัดตัวด้วยเครื่องเอกซทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 10, 20, 30 และ 40 รอบต่อนาทีตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 90,100 และ 105 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยการทดลองทำการวัดความดันด้วย Pressure Transducers ผลิตโดยบริษัท Dynisco Instruments รุ่น DYNA-4-7C-15 ที่ตำแหน่งหัวคายเพื่อนำค่าความดันที่ได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากซอฟต์แวร์ด้านพลศาสตร์ของไหล ผลที่ได้ดังกล่าวเป็นดัชนีชี้วัดความน่าเชื่อถือของวิธีการจำลองและคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้า รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งที่ใช้วัดความดันของสกรูที่ใช้ในการจำลองและทดลอง



รูปที่ 2.5 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งที่ใช้วัดความดัน

2.5 กรรมวิธีแปลงรูปผลการจำลองการไหลเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิต

กรรมวิธีแปลงผลการจำลองเพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการผลิตกระทำโดยหาสมการจากกราฟ 3 มิติโดยใช้โปรแกรม SigmaPlot 11.0 โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการผลิตประกอบไปด้วย ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วรอบหมุนสกรูและความชื้นที่มีอิทธิพลต่อความดันและความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วรอบหมุนสกรูและความชื้นที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทราซัน

2.6 วิธีการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิทยากระแส

2.6.1 วิธีวัดความชื้น

เตรียมตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้นร้อยละ 47,54 และ 60 โดยใส่ตัวอย่างแป้งในภาชนะทรงกระบอกอลูมิเนียมแล้วนำไปตั้งบนน้ำที่มีอุณหภูมิ 90°C และปรับความชื้นด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความชื้นต่างๆ ดังกล่าว การวัดความชื้นของแป้งข้าวเจ้าใช้หลักการอบแห้งเพื่อวัดน้ำหนักแบบรวดเร็วอย่างอัตโนมัติโดยใช้เครื่อง HR73 Halogen Moisture Analyzer ผลิตโดยบริษัท Toledo รุ่น HR73-P กระบวนการวัดใช้ตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าน้ำหนักประมาณ 0.200 กรัมต่อครั้ง ทำการวัดอย่างน้อย 3 ซ้ำ ค่าความชื้นของตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าได้ถูกนำเสนอในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความชื้นเปียก (% Moisture content , wet basis) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{\text{Wet sample weight (g)} - \text{Dry sample weight (g)} \times 100}{\text{Wet sample weight (g)}} \quad (2-1)$$

2.6.2 วิธีการวัดความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าในลักษณะที่ปรากฏ (Bulk Density) กระทำโดยหาอัตราส่วนระหว่างมวลของตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตรที่บรรจุ การวัดทำได้โดยนำตัวอย่างแป้งใส่กระบอกลงเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ จากนั้นนำตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{Density} = \frac{\text{Simple Weight (g)}}{\text{Volume (cc)}} \quad (2-2)$$

2.6.3 วิธีการวัดค่าความหนืด

การวัดค่าความหนืดใช้หลักการวัดความหนืดแบบ capillary rheometer แป้งข้าวเจ้าที่ปรับความชื้นในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโดยนำมาวัดหาความหนืดด้วยเครื่อง Capillary Rheometer (KAYENESS, Dynisco company) ซึ่งมีค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหาความหนืดที่ 90, 105 และ 120 °C ที่เส้นผ่านศูนย์กลางหัวดายเท่ากับ 1.0000mm ความสูงของหัวดายเท่ากับ 20.0000mm และเวลาที่แป้งอยู่ในเครื่องก่อนทำการวัดความหนืด (Melt time) เท่ากับ 30 วินาที ผลที่ได้จากการวัดถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับแป้งข้าวเจ้าซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะถูกใช้ในการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหล

บทที่ 3

ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมรายละเอียดของผลการวิจัยเรื่องการจำลองพฤติกรรมคาร์ไฮลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันด้วยโปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยแบ่งการนำเสนอผลการวิจัยออกเป็นสามส่วนหลักคือ ส่วนแรกแสดงถึงผลทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและแบบสมการวิทยากระแสน้ำของแป้งโดข้าวเจ้า ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ผลเพื่อยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ประยุกต์ใช้เพื่อการจำลองการไหล และส่วนที่สามของผลวิจัยแสดงถึงผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันที่มีผลต่อพฤติกรรมคาร์ไฮลภายในเครื่องระหว่างกระบวนการแปรรูป

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิทยากระแส

3.1.1 ผลการวัดความหนาแน่น

ตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นของตัวอย่างในลักษณะที่ปรากฏวัดได้เท่ากับ 1200 kg/m^3

3.1.2 ผลการวัดความหนืด

ลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าสุก

แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการวัดความหนืดโดยเครื่อง capillary rheometer ในช่วงอุณหภูมิ $90 - 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องดังรูปที่ 3.4 และมีลักษณะนุ่ม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 mm เส้นมีความเรียบเนียนต่อเนื่อง แป้งที่ออกมาจากกระบวนการวัดความหนืดนั้นจะมีกลิ่นหอมที่บ่งบอกถึงความสุกของแป้ง



รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าสุกหลังผ่านกระบวนการวัดความหนืด

ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จากเครื่องวัดความชื้น

ความชื้นของตัวอย่างแป้งโดข้าวเจ้ามีผลต่อความชื้นของแป้งโดสุกโดยตรง เนื่องจากปริมาณความชื้นในเม็คแป้งมีผลต่อกระบวนการไหลขณะแป้งโดถูกแปรรูปให้สุกภายในเครื่องมือวัดความชื้น ดังนั้นคุณสมบัติความชื้นของแป้งโดที่มีต่อการต้านทานการไหลจึงเปลี่ยนไปตามปริมาณความชื้นที่ปรากฏขณะทำการทดสอบ ทั้งนี้หลักการวัดความชื้นด้วยเครื่อง capillary rheometer เป็นการอัดรีดแป้งโดข้าวเจ้าผ่านหัวคายซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีผลทำให้ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ไหลออกจากหัวคายของเครื่องมือทดสอบมีค่าแตกต่างไปจากแป้งโดอัดตัวที่ถูกทำให้สุกอยู่ในถ้วยทดสอบ ปริมาณความชื้นของแป้งโดสุกที่ไหลออกจากเครื่องมือวัดความชื้นเมื่อเทียบกับความชื้นของแป้งโดที่ใช้ทดสอบแตกต่างกันสามระดับแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าจากค่าความชื้นของแป้งโดสุกที่อุณหภูมิทดสอบทั้ง 3 ค่าของแต่ละชุดแป้งโดที่มีค่าความชื้นตั้งต้นเท่ากัน มีค่าความชื้นไม่แตกต่างกันไม่มากและไม่ปรากฏว่าที่อุณหภูมิทดสอบสูงขึ้นปริมาณความชื้นที่เหลือจะน้อยลงแสดงให้เห็นว่าไม่มีปรากฏการณ์การระเหยของไอน้ำเกี่ยวพันขณะทำการทดสอบวัดค่าความชื้นซึ่งสอดคล้องกับการไม่สังเกตเห็นไอน้ำขณะที่แป้งโดสุกไหลออกจากหัวคาย และจากการที่ค่าความชื้นของแป้งโดสุกมีค่าน้อยกว่าแป้งโดดิบก่อนทดสอบในทุกกรณีจึงน่าจะมีสาเหตุมาจากการดูดความชื้นไว้โดยเม็คแป้งในถ้วยทดสอบของเครื่องมือขณะทำการวัดความชื้นซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าตัวอย่างที่ถูกอัดรีดไหลผ่านหัวคาย ดังนั้นการระบุหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นต่อความชื้นควรระบุให้ชัดเจนว่าเป็นค่าความชื้นของแป้งโดดิบหรือแป้งโดสุก

ตารางที่ 3.1 ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าและแป้งโดข้าวเจ้าสุกที่ผลิตได้จากเครื่องวัดความชื้น

ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้า (% แบบเปียก)	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าสุก (% แบบเปียก)			Average
		1	2	2	
47	90	28.95	27.69	28.71	28.45
	105	30.68	29.61	28.83	29.71
	120	30.00	31.51	30.03	30.51
54	90	39.93	34.75	42.81	39.16
	105	38.80	28.62	31.42	32.98
	120	37.65	40.35	39.64	39.21
60	90	40.93	42.05	47.34	43.44
	105	44.36	47.37	44.44	45.39
	120	43.86	47.44	44.61	45.30

ผลของค่าความหนืด

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของแป้งโคข้าวเจ้าสุกพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นกับอิทธิพลของอัตราเฉือนและอุณหภูมิที่ใช้แปรรูปซึ่งอธิบายได้จากแบบสมการ power law fluid models (Gibson, 1998) ดังปรากฏในรูปสมการที่ (3-1) และสมการที่ (3-2) ตามลำดับดังนี้

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (3-1)$$

$$\eta = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \times \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (3-2)$$

เมื่อให้ η = ค่าความหนืดที่ปรากฏ $\dot{\gamma}$ = อัตราเฉือน k = สัมประสิทธิ์ประกอบสมการวิทยากระแส n = สัมประสิทธิ์บ่งชี้พฤติกรรมการไหลภายใต้ความเค้นเฉือนตามสมการวิทยากระแส T = อุณหภูมิตัวอย่าง และ T_0 = อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ทดสอบหาค่า k และ n

ค่าคงที่ k และ n ในแบบสมการ power law ประมาณได้จากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่แปรตามค่าอัตราเฉือนด้วยการใช้เทคนิคการหาตัวแปรไม่ทราบค่าโดยใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ค่าคงที่ทั้งสองสำหรับแป้งโคข้าวเจ้าสุกพร้อมทั้งค่าความหนืดต่ำสุดและค่าประมาณการความหนืดสูงสุดของแต่ละความชื้นและอุณหภูมิอ้างอิงสรุปไว้ในตารางที่ 3.2 แบบสมการวิทยากระแสดังกล่าวนี้มีความสำคัญมากในการใช้เพื่องานจำลองพฤติกรรมการไหลในกระบวนการแปรรูปแป้งโคเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อนำข้อมูลไปพัฒนาหรือสร้างเครื่องมือในการแปรรูปแป้งโคข้าวเจ้า



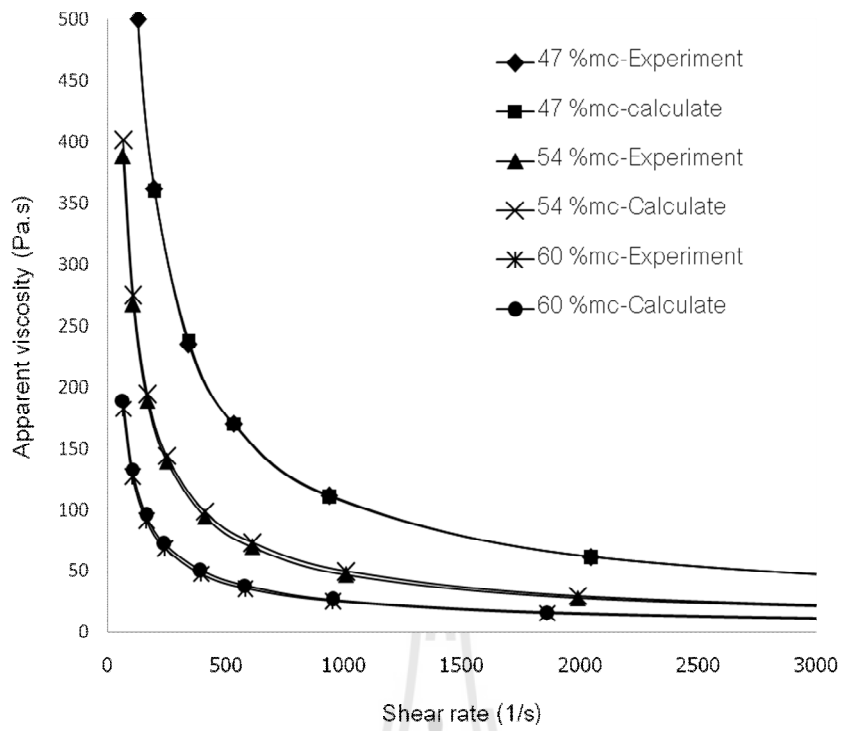
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแป้งโดข้าวเจ้า

ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนครั้ง	ค่าคำนวณ		ค่าเฉลี่ย		η_{\max} (Pa.s)	η_{\min} (Pa.s)
			k	n	K	n		
47	90	1	6525.76	0.2466	7213.01	0.2438	3437.15	3.25
		2	7476.99	0.2468				
		3	7636.28	0.2380				
	105	1	8600.95	0.1362	7308.43	0.2046		
		2	5632.45	0.2521				
		3	7691.88	0.2254				
	120	1	1498.34	0.3484	1148.46	0.4020		
		2	878.79	0.4317				
		3	1068.24	0.4260				
54	90	1	1933.69	0.2947	3439.06	0.2437	1624.55	1.48
		2	5234.65	0.2280				
		3	3148.83	0.2083				
	105	1	976.25	0.3857	1643.97	0.3044		
		2	1711.83	0.2816				
		3	2243.85	0.2458				
	120	1	673.23	0.3378	719.32	0.3296		
		2	847.08	0.3151				
		3	637.63	0.3360				
60	90	1	1036.19	0.2805	1427.96	0.2730	727.84	0.9
		2	2308.68	0.2403				
		3	939.01	0.2983				
	105	1	1928.46	0.1391	1173.48	0.2416		
		2	957.89	0.2710				
		3	634.08	0.3147				
	120	1	325.37	0.3664	293.60	0.4220		
		2	89.43	0.5965				
		3	466.00	0.3029				

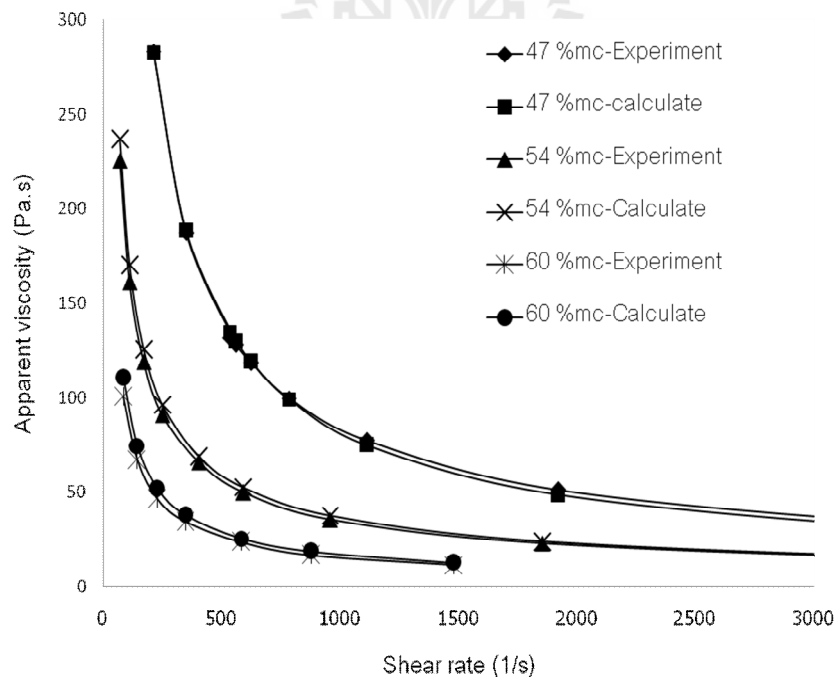
ภาพการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดปรากฏภายใต้อิทธิพลของค่าอัตราเฉือนของตัวอย่างที่มีระดับความชื้นตั้งต้นต่างกันสามค่าของทั้งสามค่าอุณหภูมิทดสอบที่ 90, 105, 120 °C แสดงไว้ดังรูปที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดของแป้งโคข้าวเจ้าสุกมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้นเหมือนกันทุกอุณหภูมิทดสอบ และที่อุณหภูมิเดียวกันจะเห็นว่าสำหรับค่าอัตราเฉือนค่าใดค่าหนึ่งความหนืดของแป้งโคข้าวเจ้าสุกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นในแป้งโคดิบลดต่ำลง

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดปรากฏของแป้งโคข้าวเจ้าสุกพบว่าช่วงแรกของการเริ่มต้นทดสอบเมื่อให้ค่าอัตราเฉือนที่ต่ำค่าความหนืดจะมีค่าสูงโดยค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเข้าสู่ค่าค่าความหนืดคงที่ค่าหนึ่ง และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดของแป้งโคข้าวเจ้าทั้งสามความชื้นหรือที่ 47, 54 และ 60 %ความชื้นเปียกจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดปรากฏในช่วงประมาณ 10-25 Pa.s

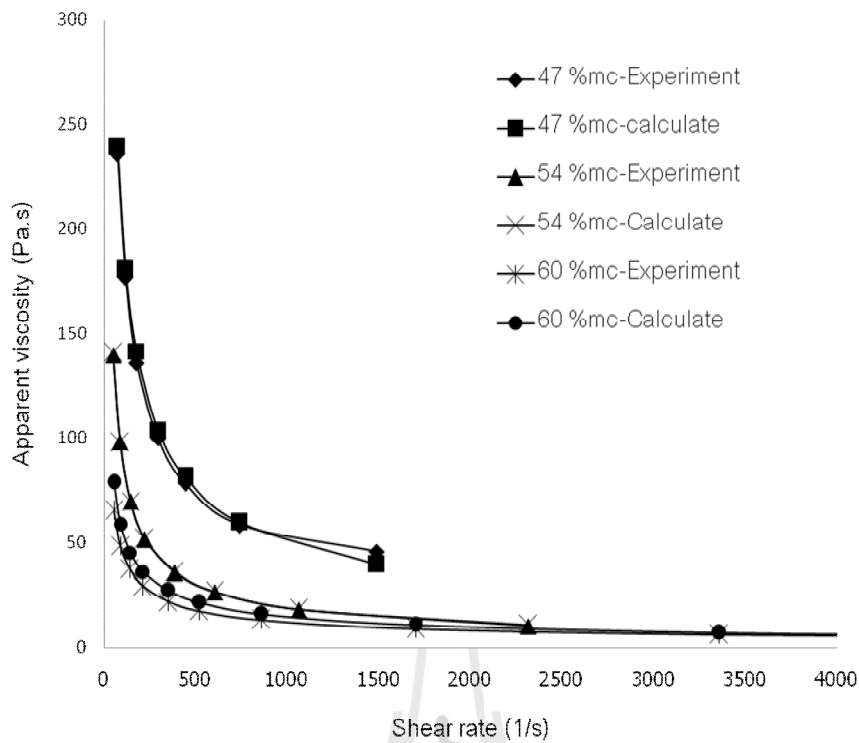
เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความร้อนต่อค่าความหนืดปรากฏที่ความชื้นตั้งต้นคงที่ค่าใดค่าหนึ่งจะเห็นว่าความหนืดปรากฏของแป้งโคข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสจะมีค่าน้อยที่สุดและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิทำให้สุกลดลง (105 , 90 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายด้วยความร้อนและเกิด gelatinization ทำให้พฤติกรรมการไหลของแป้งไหลได้ง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับความชื้นที่ต่างกันซึ่งปริมาณน้ำก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยทำให้แป้งเกิด gelatinization ซึ่งทำให้พฤติกรรมการไหลของแป้งไหลได้ง่ายขึ้นเช่นกันกับอุณหภูมิ และยังมีรายงานวิจัยว่าขนาดของเม็ดแป้งยังมีส่วนต่อความหนืดของแป้งอีกด้วย (Edwards et al., 2002)



รูปที่ 3.2 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าจากการทดลองและการคำนวณที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

แบบสมการวิทยาระแสของแป้งโดข้าวเจ้า

พฤติกรรมการลดลงของค่าความหนืดของแป้งโดข้าวเจ้าสุกผกผันกับค่าอัตราเฉือนอธิบายได้จากกระบวนการอัดรีดแป้งโดขณะให้ความร้อนเพื่อทำให้แป้งสุกผ่านหัวตายของเครื่อง capillary rheometer เป็นกระบวนการที่ทำให้เม็ดแป้งโดเกิดการรวมตัวแน่นมากยิ่งขึ้นพร้อมทั้งความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพกลายเป็นแป้งโดสุกภายใต้อิทธิพลของแรงกดโดยส่งผลให้ใช้ค่าแรงกดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ก่อนที่แป้งโดสุกจะไหลออกจากหัวตาย และเนื่องจากแป้งโดไม่ใช่ของเหลวการต้านทานการไหลภายใต้แรงกดอัดในช่วงแรกต้องใช้แรงในการกดอัดมาก เมื่อแป้งโดสุกไหลผ่านหัวตายออกมาทำให้การต้านทานการไหลภายใต้แรงกดอัดลดลงซึ่งความหนืดของแป้งโดทั้ง 3 ความชื้น และ 3 อุณหภูมิ อธิบายได้ดังสมการที่ (3-3), (3-4), (3-5), (3-6), (3-7), (3-8), (3-9), (3-10), และ (3-11) ทั้งนี้รูปสมการ power law ที่ใช้เป็นตัวแทนค่าความหนืดในที่นี้ไม่ได้สะท้อนว่าความหนืดมีค่าสูงไม่จำกัดเมื่ออัตราเฉือนลดต่ำลงเรื่อยๆ หากแป้งโดสุกยังไหลได้หรือยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเป็นของแข็ง ดังข้อเท็จจริงที่สังเกตเห็นได้จากสภาพแป้งโดสุกที่มีลักษณะปรากฏเป็นของแข็งกึ่งหนืดหรือจัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นแบบหนืดขณะไหลออกจากหัวตาย ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบสมการชุดดังกล่าวนี้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องมือแปรรูปอาหารจึงจำเป็นต้องระบุค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุดประกอบเสมอค่าดังกล่าวนี้รายงานไว้ด้วยแล้วในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่อง capillary rheometer ที่ไม่สามารถให้ค่าความหนืดปรากฏ

สำหรับอัตราเงินที่ต่ำกว่าหลักหน่วย แต่ให้ค่าความแม่นยำสูงในการหาค่าความหนืดปรากฏในย่านอัตราเงินสูง ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดจึงเป็นค่าที่วิเคราะห์ได้อย่างชัดเจนจากผลการทดสอบ ส่วนค่าความหนืดปรากฏสูงสุดนั้นเป็นค่าประมาณการจากค่าเฉลี่ย ณ ค่าอัตราเงินต่ำสุดที่เครื่องทดสอบรายงานผลได้

ที่ความชื้น 60%

$$\eta = 1427.96\dot{\gamma}^{(0.2730-1)} \times \exp\left(\frac{90}{90}\right) \quad (3-3)$$

$$\eta = 1173.48\dot{\gamma}^{(0.2416-1)} \times \exp\left(\frac{105}{105}\right) \quad (3-4)$$

$$\eta = 293.60\dot{\gamma}^{(0.4220-1)} \times \exp\left(\frac{120}{120}\right) \quad (3-5)$$

ที่ความชื้น 54%

$$\eta = 3439\dot{\gamma}^{(0.2437-1)} \times \exp\left(\frac{90}{90}\right) \quad (3-6)$$

$$\eta = 1643.97\dot{\gamma}^{(0.3044-1)} \times \exp\left(\frac{105}{105}\right) \quad (3-7)$$

$$\eta = 719.32\dot{\gamma}^{(0.3296-1)} \times \exp\left(\frac{120}{120}\right) \quad (3-8)$$

ที่ความชื้น 47%

$$\eta = 7213.01\dot{\gamma}^{(0.2438-1)} \times \exp\left(\frac{90}{90}\right) \quad (3-9)$$

$$\eta = 7308.43\dot{\gamma}^{(0.2046-1)} \times \exp\left(\frac{105}{105}\right) \quad (3-10)$$

$$\eta = 1148\dot{\gamma}^{(0.4020-1)} \times \exp\left(\frac{120}{120}\right) \quad (3-11)$$

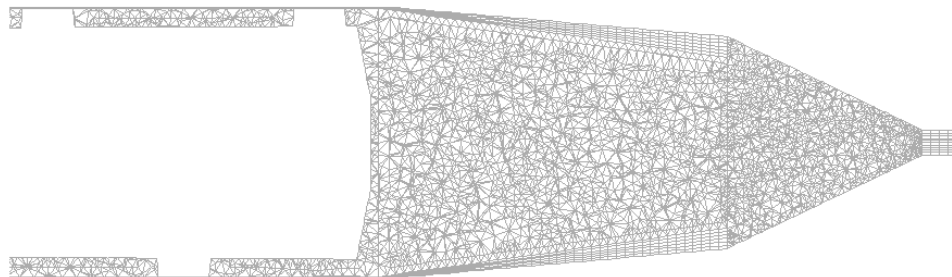
3.2 ผลการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแป้งข้าวเจ้า

ภาพ mesh element ของช่องทางการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวทั้งสามแบบสกรู (Model 1, 2, และ 3) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีมิติคงที่ให้รายละเอียดไว้แล้วในบทที่สองปรากฏดังรูปที่ 3.5-3.7 ตามลำดับ โดยแบบที่ 1 เป็นภาพ mesh element ของเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยวของเครื่อง Betol รุ่น BC32 ซึ่งเป็นเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ถูกใช้ในการจำลองหลักเพื่อหาผลของตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนแบบที่ 2 และ 3 เป็นภาพ mesh element ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบผลของความลึกของช่องทางการไหล เนื่องด้วยงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตการจำลองแบบ 3D เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งโดข้างเข้าในเครื่องเอกซ์ทรูชันการสร้าง mesh element สำหรับทุกแบบสกรูจึงทำครอบคลุมตลอดทั่วทั้งตัวสกรู ซึ่งมีรายละเอียดสรุปจำนวน mesh ดังปรากฏในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียด mesh element

Model	Cells	Faces	Nodes
1	859482	2238989	414052
2	939313	1947746	194605
3	734110	1526131	153748

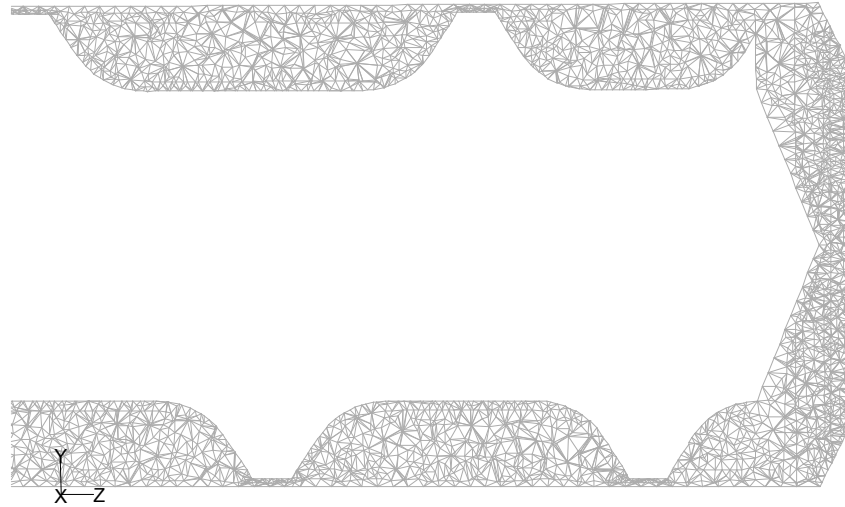
กรรมวิธีการทดสอบที่ใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการสร้าง แบบ และจำนวน mesh element ได้รายงานไว้ในบทที่ 2 โดยผลการทดสอบความถูกต้องได้รายงานไว้ในหัวข้อถัดไปจากนี้ ควบคู่ไปพร้อมกันกับการแสดงถึงความถูกต้องของกรรมวิธีหรือแบบสมการที่กำหนดเลือกใช้เพื่อการจำลองการไหลของแป็งโคข้าวเจ้าขณะถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในเครื่องเอกซ์ทราชั้น



Grid

May 01, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

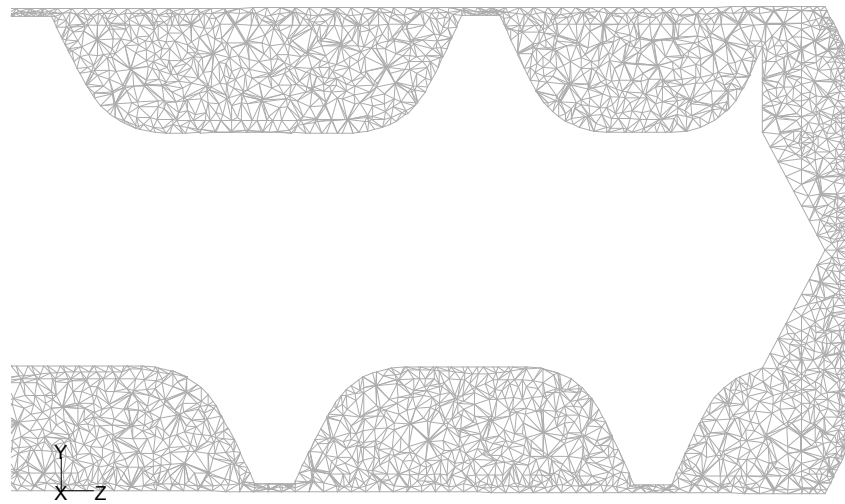
รูปที่ 3.5 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทราชั้น Model 1 ณ ตำแหน่งปลายทางออก



Grid

Jun 29, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

รูปที่ 3.6 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซเรย์รุ่น Model 2 (D:H = 6) ณ ตำแหน่งปลายทางออก



Grid

Jun 29, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

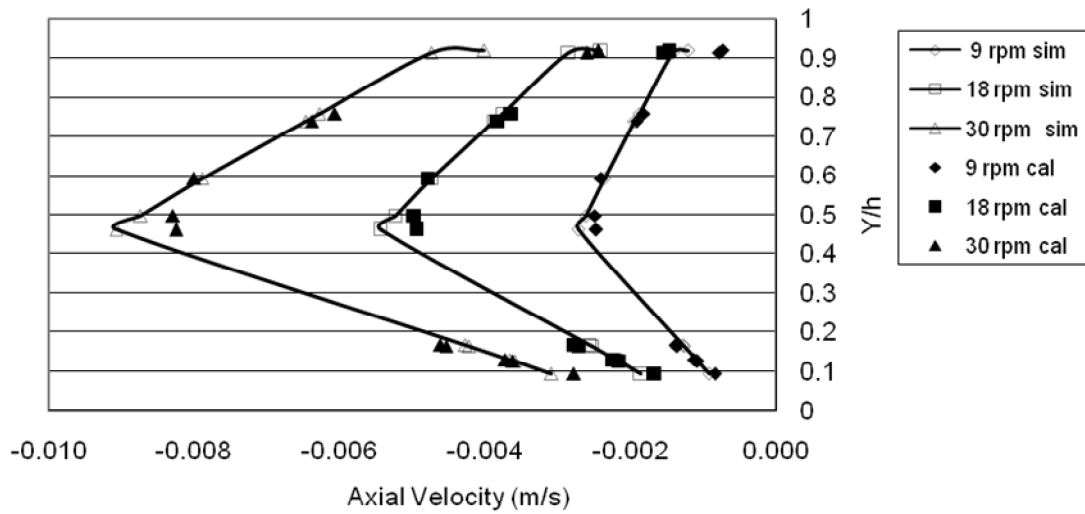
รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง mesh element ของช่องทางการไหลในเครื่องเอกซเรย์รุ่น Model 3 (D:H = 4) ณ ตำแหน่งปลายทางออก

3.3 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีที่ใช้เพื่อการจำลองการไหล

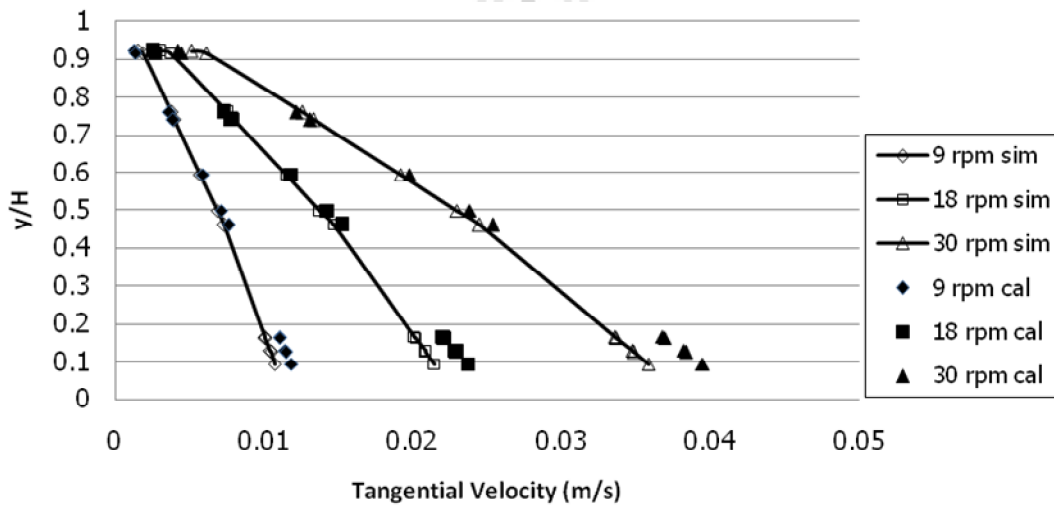
การตรวจสอบความเหมาะสมของ mesh element ที่สร้างให้กับสกรู model 1 ซึ่งเป็นสกรูที่ใช้สำหรับการจำลองผลกระทบโดยการเปรียบเทียบค่าความเร็วของของไหลภายในเครื่องเอกซ์ทูล์วชั้นในแนว axial และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้จากผลการจำลองและผลการคำนวณด้วยการใช้สมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) ที่เหมาะสำหรับการไหลของของไหลชนิดนิวโทเนียนในเครื่องเอกซ์ทูล์วชั้น โดยการจำลองใช้ตัวอย่างของไหลสองชนิดคือน้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีแบบสมการวิหยากระแสมือเหมือนกันกับที่อ้างอิงโดย Li and Hsieh (1995) ในการพิสูจน์ความถูกต้องของผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ และแบ่งโดเมนเข้าที่ความหนืดคงตัว ผลความใกล้เคียงกันของค่าคำนวณที่ใช้ในการเปรียบเทียบดังกล่าวถูกใช้เป็นดัชนีชี้วัดความถูกต้องของ mesh element ที่สร้างให้กับช่องทางการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทูล์วชั้น และแบบสมการการจำลองที่กำหนดเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยผลการเปรียบเทียบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพด

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วเชิงเส้นแนว axial และแนว tangential ขึ้นกับตำแหน่งความห่างจากผิวสกรูถึงผิวปลอกสกรูในช่วงหนึ่งช่องทางการไหล (แสดงในรูปของค่า y/H) ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบหมุนสกรูเท่ากับ 9, 18 และ 30 รอบต่อวินาทีตามลำดับถูกแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าผลจากการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันรวมถึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ ความเร็วรอบ โดยเฉพาะความเร็วในแนว tangential พบว่าค่าที่ได้จากสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ควรที่จะระบุไว้ในที่นี้ว่า Li and Hsieh (1995) ได้ใช้ข้อมูลการทดลองวัดค่าการเพิ่มขึ้นของความดันในช่องทางการไหลของสกรูเดี่ยวที่ใช้น้ำเชื่อมข้าวโพดเป็นตัวอย่างจากงานวิจัยของ Choo (1980) พิสูจน์ให้เห็นว่าค่าอัตราการไหลที่คำนวณได้จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันกับงานทดลองของ Choo และจากการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลพบว่าผลจากการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ได้ก็มีค่าใกล้เคียงกันมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าหากผลการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนว axial และ ความเร็วในแนว tangential ในช่องทางการไหลที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบและจำนวน mesh element รวมถึงกรรมวิธีที่กำหนดเลือกใช้ใน โปรแกรม Fluent เพื่อการจำลองหาพฤติกรรมการไหลมีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นแบบจำลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.8 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุน 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C



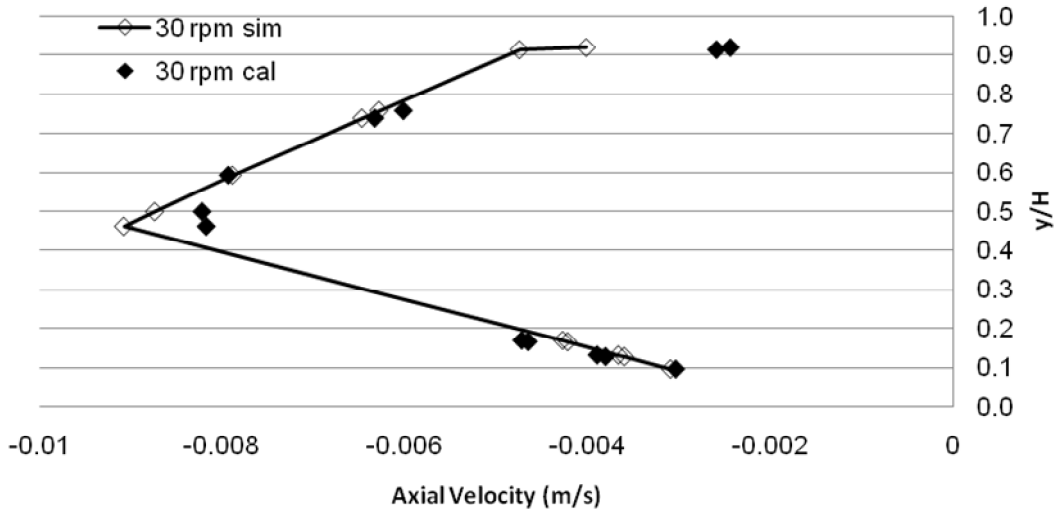
รูปที่ 3.9 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพดที่ความเร็วรอบหมุน 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C

ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ กับผลที่ได้จากการจำลองของน้ำเชื่อมข้าวโพด ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 9,18 และ 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 °C

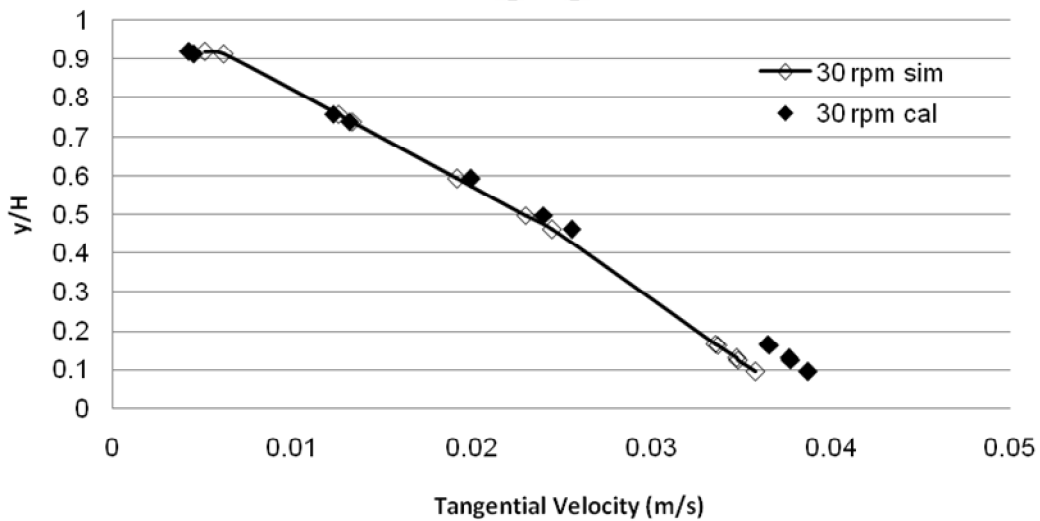
ความเร็วรอบหมุน สกรู (rpm)	ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (kg/s)	ผลการจำลอง(kg/s)	%ความแตกต่าง(%)
9	0.000733	0.000619	18.72
18	0.001466	0.001235	18.72
30	0.002444	0.002059	18.72

3.3.2 ผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงเส้นในแนว axial แนว tangential และอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลการจำลองและผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว

จากพฤติกรรมของการเปลี่ยนสภาพของแป้งโดข้าวเจ้าเกิดขึ้นจากความร้อนในเครื่องเอกซ์ทรูชัน พบว่ากระบวนการแปรรูปแป้งให้แป้งโดสุกนี้ส่งผลให้การต้านทานการไหลหรือการเปลี่ยนรูปของแป้งโดระหว่างที่ถูกทำให้สุกนี้จัดเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนซึ่งโดยทั่วไปแล้วความหนืดจะมีค่าไม่คงตัวหากแต่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน และในกรณีของแป้งโดข้าวเจ้ายังจัดเป็นวัสดุในกลุ่มที่ความหนืดปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น (shear thinning model) เพื่อทดสอบความเหมาะสมของกรรมวิธีที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองจึงกำหนดให้แป้งโดข้าวเจ้ามีค่าความหนืดคงตัวในช่วงค่าสูงซึ่งมักเป็นอุปสรรคของการจำลองในหลายกรณีศึกษาวิจัยอื่นที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้แป้งโดข้าวเจ้าที่ถูกอัดตัวและทำให้สุกในเครื่องเอกซ์ทรูชันจะมีค่าความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจำนวนเซลล์หรือ mesh element ที่สร้างขึ้น และกรรมวิธีจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลภายในเครื่องเอกซ์ทรูชันจำเป็นต้องติดตามพฤติกรรมการไหลที่ค่าความหนืดสูงได้ การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนว axial และ แนว tangential ในช่องทางไหลที่ได้ ระหว่างผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแป้งโดข้าวเจ้าที่กำหนดให้มีความหนืดคงที่พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนค่ามีความใกล้เคียงกันคล้ายในกรณีของน้ำเชื่อมข้าวโพดดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ ส่วนผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของแป้งโดข้าวเจ้าที่กำหนดให้มีความหนืดคงที่ระหว่างผลการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์พบว่ามีความแตกต่างประมาณ 15 % ดังแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.10 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว axial ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.11 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนว tangential ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลจากการจำลองของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความหนืดคงตัว ที่ความเร็วรอบหมุนสกรู 30 รอบต่อนาที

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (kg/s)	ผลจากการจำลอง(kg/s)	%ความแตกต่าง(%)
0.002055	0.001777	15.34

จากผลการเปรียบเทียบสามารถยืนยันได้ว่าจำนวนเซลล์รวมถึงคุณภาพของเซลล์ที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลภายในเครื่องเอกซ்தูชันชนิดสกรูเดี่ยว model 1 สามารถติดตามพฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนซึ่งมีค่าความหนืดในย่านค่าต่ำ และของไหลแบบนอนนิวโทเนียนซึ่งมีค่าความหนืดในย่านค่าสูง ผลการใช้วิธีการจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของแป้งโคข้าวเจ้าที่มีความหนืดดั่งแบบสมการ power law ที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.1.2 ในเครื่องเอกซ்தูชันทั้งสามแบบสกรูซึ่งใช้เทคนิคการสร้าง mesh แบบเดียวกันกับที่ใช้ในแบบสกรู model 1 ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องดังกล่าวมาแล้วนั้น มีรายละเอียดดังหัวข้อถัดไป

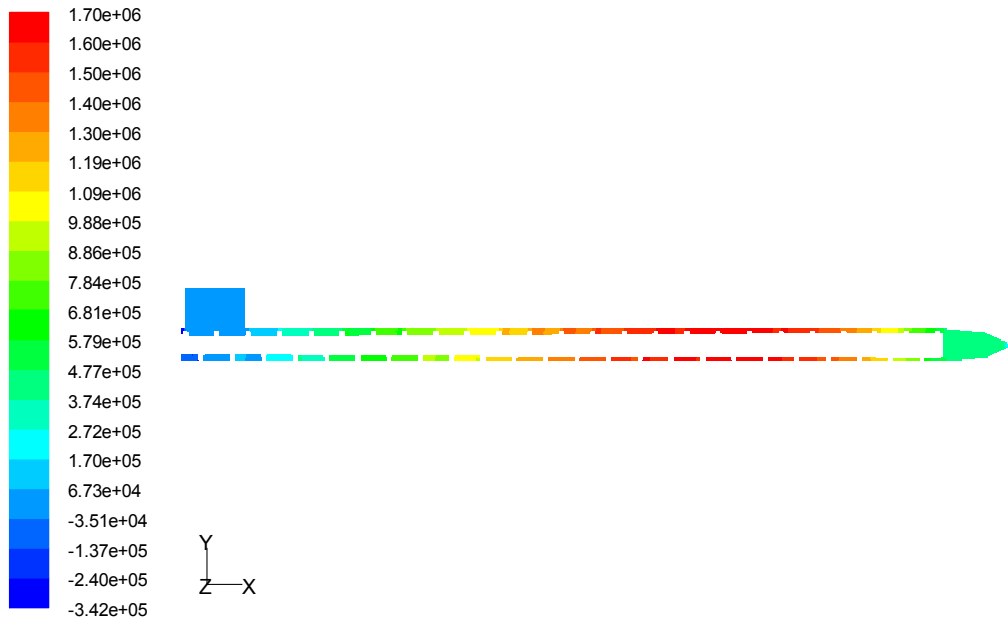
3.4 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ்தูชัน

การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโคข้าวเจ้าให้กับสกรู model 1 ประกอบไปด้วยการศึกษาถึงผลของความชื้นของแป้งโค ความเร็วรอบหมุนสกรู และความร้อนหรืออุณหภูมิแปรรูปที่มีต่อค่าความดันในเนื้อมวลของแป้งโคข้าวเจ้า ความเร็ว อัตราเฉือน และอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ โดยการจำลองการไหลเป็นแบบอุณหภูมิคงตัว (Isothermal) และเป็นสภาวะการไหลแบบไม่อัดตัวตลอดความยาวสกรู นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล (D:H ratio) โดยใช้แบบสกรู model 2 และ model 3 ผลการจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ความดันที่ปรากฏในเนื้อแป้งข้าวเจ้า

ความดันเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต เนื่องจากเป็นดัชนีบ่งบอกได้ว่าแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดตัวผ่านหัวคायมีคุณลักษณะอย่างไรซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับคุณภาพของตัวผลิตภัณฑ์ทั้งในแง่สภาพความสุก และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและอัดตัวของแป้งโคข้าวเจ้าที่หลายความชื้นตั้งต้นในวัตถุดิบแตกต่างกันสามระดับ ได้แก่ 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียก โดยแต่ละความชื้นยังทำการศึกษาดังอิทธิพลของอุณหภูมิแปรรูปที่ 90, 105 และ 120 °C และความเร็วรอบหมุนของสกรูที่ 10, 20, 30 และ 40 รอบต่อนาทีว่ามีผลต่อความดัน ภาพตัวอย่างผลการจำลองค่าความดันของการไหลและอัดตัวของแป้งโคข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ்தูชัน แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 ที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส %ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก พบว่าความดันในเนื้อของแป้งโคข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งตัวส่งวัสดุ จนกระทั่งถึงกลางตัวสกรูความดันจะมีค่าสูงสุด จากนั้นความดันจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่ปลายทางออกของหัวคायซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความดันลักษณะนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของความดันย้อนกลับอันเกิดจากการต้านทานการไหลออกของผลิตภัณฑ์โดยหัวคाय ส่วนผลอุณหภูมิแปรรูป และความเร็วรอบหมุนสกรูที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแต่ละ

ความขึ้นตั้งต้น สรุปข้อมูลไว้ใน ตารางที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าความลึกของช่องทางไหลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันด้วยดังมีรายละเอียดในหัวข้อเรื่องผลของมิติของสกรู



Contours of Total Pressure (pascal)

Mar 31, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

รูปที่ 3.12 แสดงผลการจำลองความดันที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งโดข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน

ตารางที่ 3.6 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายใกล้ทางออกแป้งข้าวเจ้าความชื้น 47 %

Screw speed (rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	1050290	907906	330932
20	1240510	1046230	437288
30	1367430	1136740	514727
40	1465450	1205660	515099

ตารางที่ 3.7 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวดายใกล้ทางออกแปรงข้าวเจ้าความชื้น 54 %

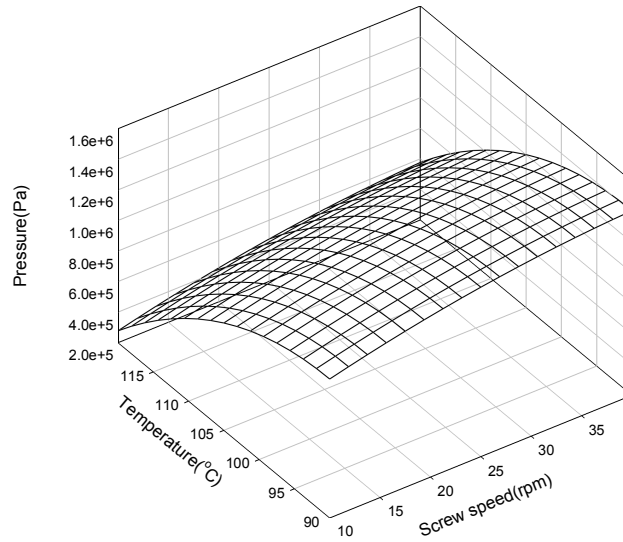
Screw speed (rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	500557	309788	151062
20	591188	382568	189847
30	651646	432848	217013
40	698348	472488	238627

ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองค่าความดันภายในหัวดายใกล้ทางออกแปรงข้าวเจ้าความชื้น 60 %

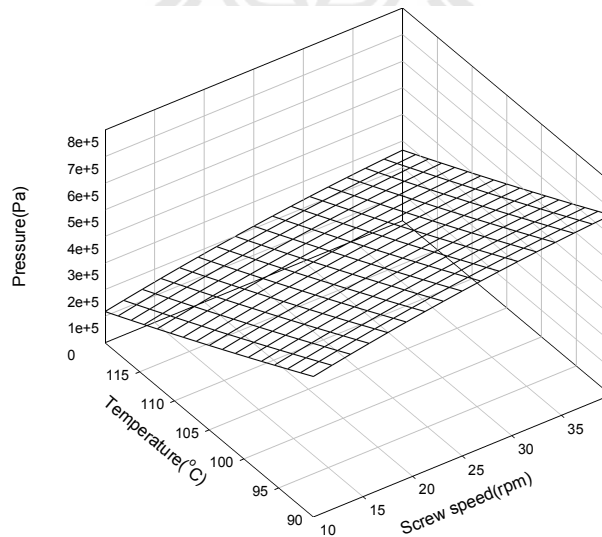
Screw speed(rpm)	Pressure near die exit area (Pa)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	234957	169677	92435
20	283187	200621	123857
30	315898	221287	146994
40	341415	237238	166000

พิจารณาข้อมูลค่าความดันที่ปรากฏในตารางที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการจำลองของแปรงข้าวเจ้าที่ความชื้น 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียกตามลำดับ พบว่าค่าความดันแปรผันกับความเร็วยรอบหมุน (Wang et al., 2004) กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบหมุนให้มีค่ามากขึ้นความดันมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันพบว่าความดันแปรผกผันกับอุณหภูมิและความชื้น (Singh et al., 1997) โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและความชื้นให้มีค่าสูงขึ้นความดันกลับมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากแปรงข้าวเจ้าที่มีความชื้นมากพอเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างของแป้งโดข้าวเจ้าดิบจะเปลี่ยนสภาพเป็นสุกหรือเกิด gelatinization และขณะที่ตัวอย่างที่มีความชื้นมากกว่าแป้งโดสุกจะมีความหนืดต่ำลงส่งผลให้สภาวะดังกล่าวไหลได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภายในตัวอย่างแป้งโดดิบที่มีความชื้นตั้งต้นเท่ากันพบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบ

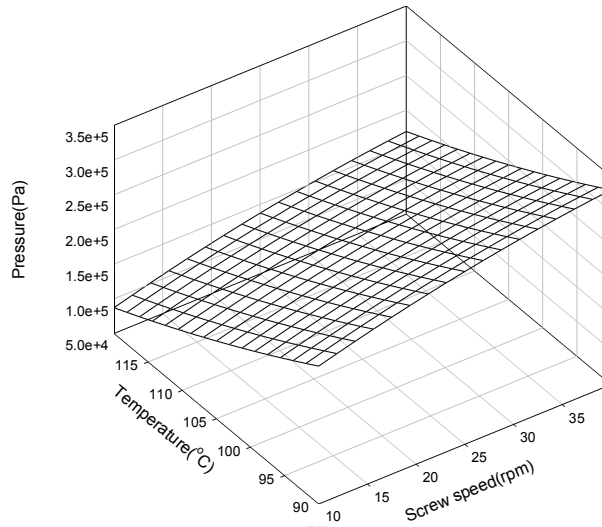
หมุนและอุณหภูมิแปรรูปที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแต่ละความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการพื้นผิวแบบพาราโบลอยด์เช่นกันดังภาพที่ปรากฏในรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 สำหรับความชื้น 47%, 54%, และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 47 % ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความความดันที่ความชื้น 54 % ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.15 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบต่อความดันที่ความชื้น 60 % ความชื้นเปียก

เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันที่ปรากฏในช่องทางการไหลเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของหัวคाय ความเร็วรอบหมุน และความร้อนที่จ่ายไว้ในกระบวนการแปรรูปมีผลต่อระยะเวลาที่แป้งโคปรากฏอยู่ในเครื่อง โดยตรงและมีผลต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยหัวคाय ค่าความดันจึงมีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก กล่าวคือ ทั้งการสุกของแป้งโคและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งชนิดใดย่อมมีค่าความดันที่เหมาะสมต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพคงที่ รูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 สามารถประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าของเงื่อนไขเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิต และเอื้อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกรูปดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรให้มีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม โดยอาศัยค่าความดันที่เหมาะสมสำหรับคงคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้นๆ ประกอบเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างเช่นการปรับค่าอุณหภูมิแปรรูปและความเร็วรอบหมุนสกรูให้สัมพันธ์กันเพื่อให้ได้ความดันตามที่ต้องการ และเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานสมการพื้นผิวแบบพาราโบลอยด์ $P(N,T)$ ที่สอดคล้องกันกับภาพความสัมพันธ์พื้นผิวแสดงผลของความเร็วรอบหมุนสกรูและอุณหภูมิแปรรูปต่อความดันของแป้งโคสุกภายในช่องทางการไหลบริเวณใกล้ทางออกสำหรับแต่ละความชื้นที่แสดงไว้ในรูป 3.13, 3.14 และ 3.15 จึงได้ให้ไว้ด้วยดังต่อไปนี้

ความชื้น 47 % ความชื้นเปียก

$$P = -6613268.16 + 21103.2067N + 167276.7499T - 222.99N^2 - 928.5256T^2 \quad (3-12)$$

ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก

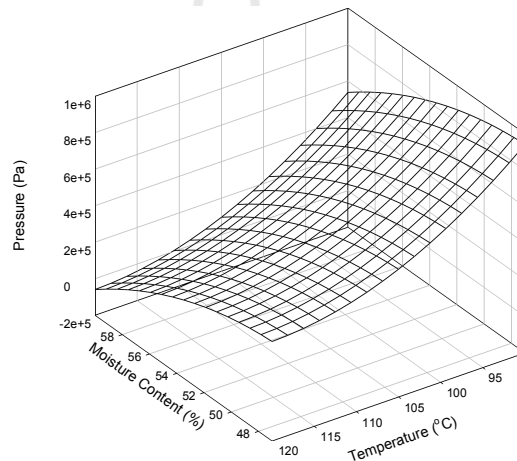
$$P = 1938978.5955 + 8866.9068N - 18715.3836T - 78.5333N^2 + 23.8356T^2 \quad (3-13)$$

ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

$$P = 971918.7232 + 4819.2984N - 10879.41856T - 41.7683N^2 + 26.1651T^2 \quad (3-14)$$

โดย P = ความดัน (Pa), N = ความเร็วรอบหมุนสกรู (rpm), T = อุณหภูมิ (°C)

นอกจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนที่มีผลต่อความดันแล้ว ความชื้นตั้งต้นของแป้งโดดิบยังเป็นอีกปัจจัยหลักที่มีผลต่อความดัน ผลการจำลองพบว่าเมื่อให้ความเร็วรอบหมุนและอุณหภูมิคงที่ที่ค่าชุดหนึ่งชุดใดความดันแปรผกผันกับความชื้น กล่าวคือเมื่อค่าความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นความดันจะมีค่าลดลง (Singh et al., 1997) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที

ทั้งนี้ลักษณะความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อความดันยังขึ้นกับความเร็วรอบหมุนสกรูด้วย สมการความสัมพันธ์ของแต่ละความเร็วรอบเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

ความเร็วรอบหมุน 10 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 5419586.3841 + 184506.5245MC - 154215.8029T - 2014.6488MC^2 \\ + 639.5430T^2 \end{array} \right) \quad (3-15)$$

ความเร็วรอบหมุน 20 รอบต่อนาที

$$P = \left(\begin{array}{l} 7337941.8279 + 176428.4820MC - 179768.7254T - 1975.7019MC^2 \\ + 744.0647T^2 \end{array} \right) \quad (3-16)$$

ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที

$$P = \begin{pmatrix} 8746609.0163 + 166496.2600MC - 197062.0661T - 1905.0070MC^2 \\ + 814.8607T^2 \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

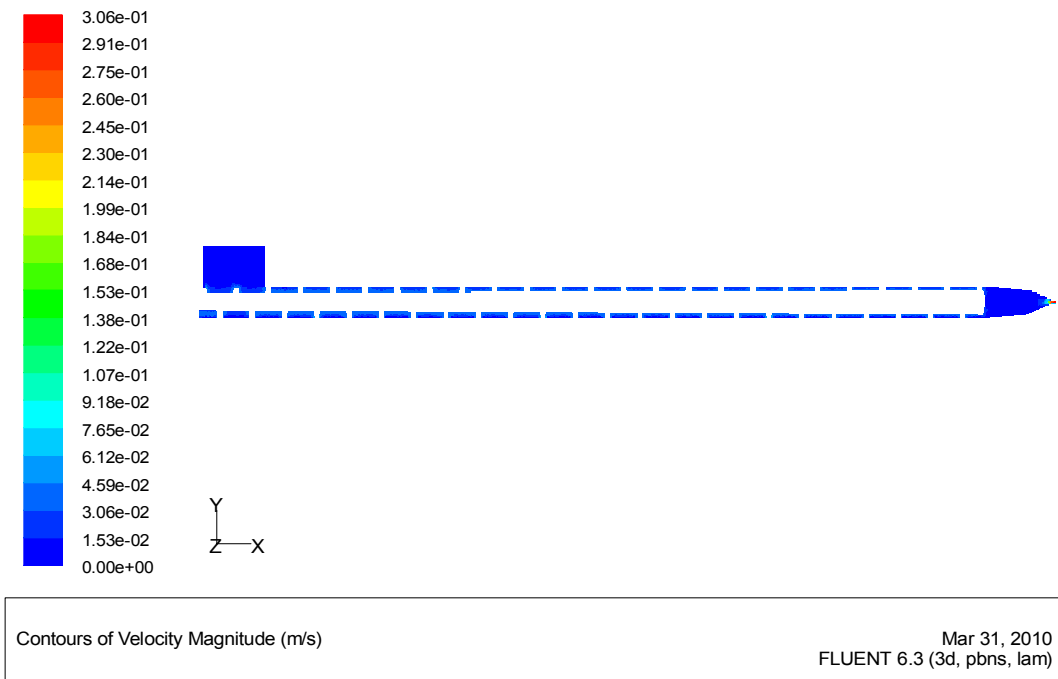
ความเร็วรอบหมุน 40 รอบต่อนาที

$$P = \begin{pmatrix} 8645265.6063 + 183449.4379MC - 200096.2218T - 2094.4201MC^2 \\ + 823.6563T^2 \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

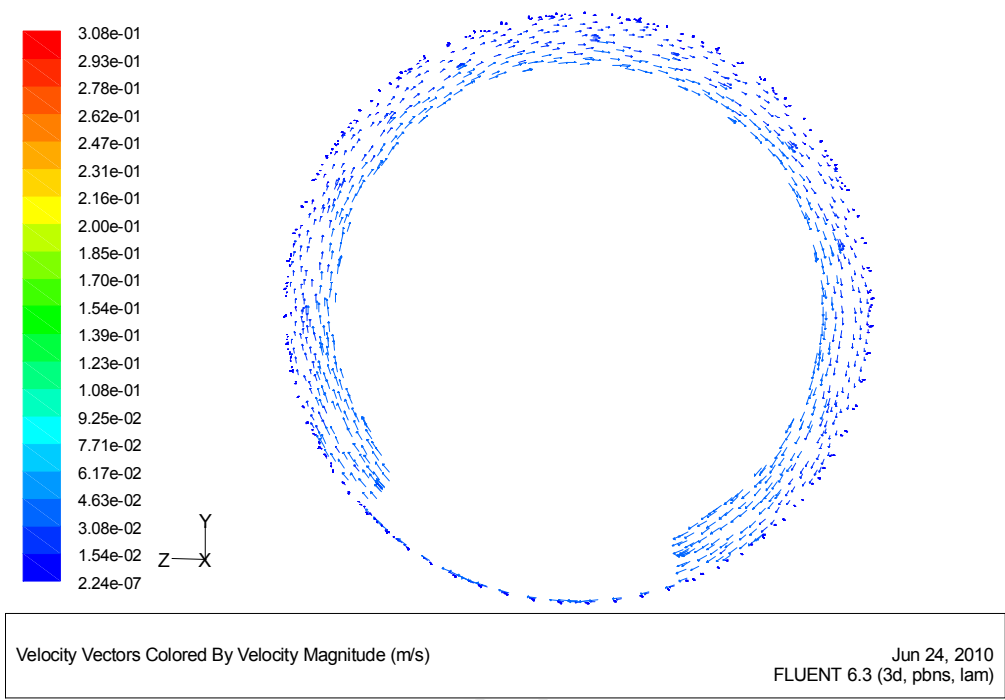
โดย MC = ความชื้นของแป้งโดข้าวเจ้าดิบ (% แบบเปียก), T = อุณหภูมิ (°C)

3.4.2 ความเร็วและอัตราเฉือนที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า

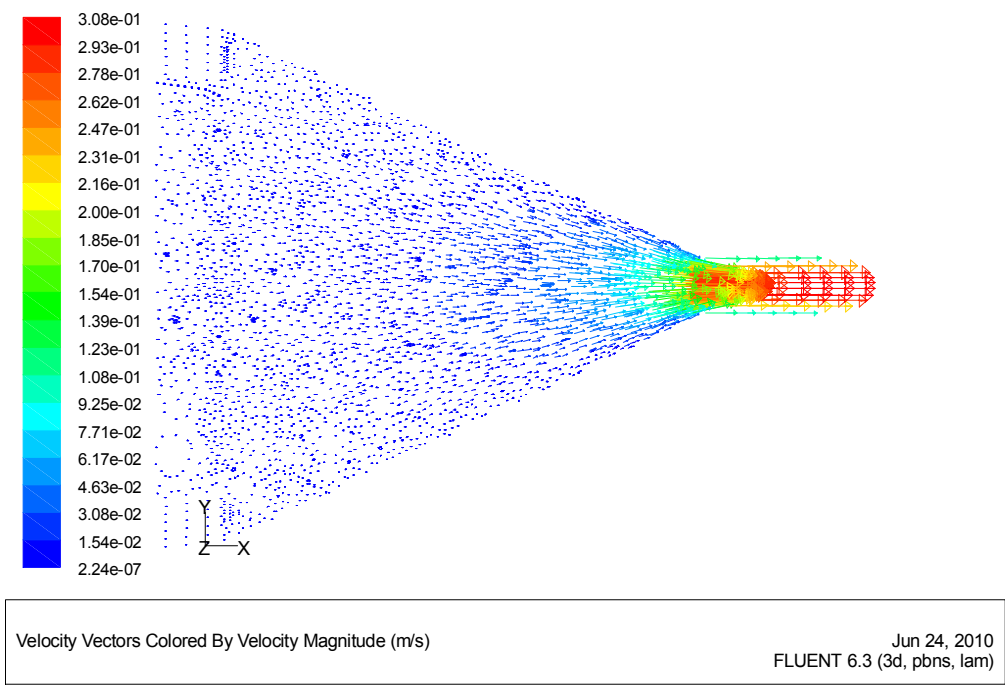
ภาพตัวอย่างการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อมวลของแป้งข้าวเจ้าในกระบวนการไหล และอัตราที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาทีอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่%ความชื้น 54 % ความชื้นเปียก แสดงในรูปที่ 3.17 ผลการจำลองพบว่าความเร็วที่ผิวของสกรูมีค่าสูงกว่าที่ผิวของ ปลอกเครื่องเอกซ์ทราชั้นและความเร็วมีค่าสูงสุดที่ปลายทางออกของหัวคายน ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นถึงความเร็วของการไหลที่สม่ำเสมอ บ่งชี้ว่าแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดรีดภายในเครื่องเอกซ์ทราชั้นได้รับการอัดรีดอย่างสม่ำเสมอ



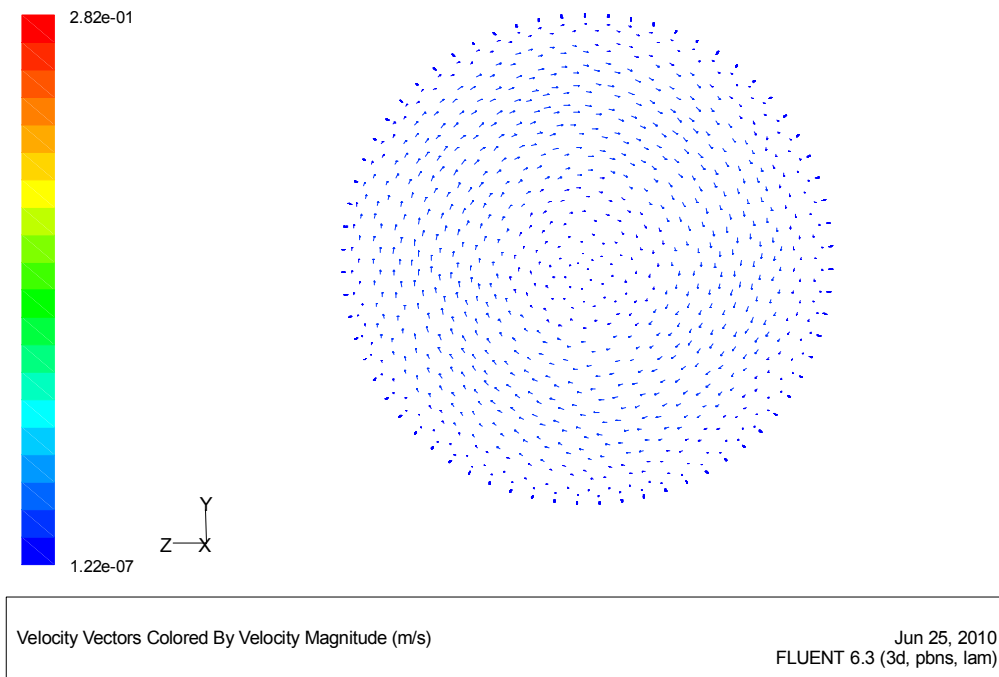
รูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองความเร็วที่ปรากฏในเนื้อของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทราชั้น



รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่ง 0.2027 m วัดจากตำแหน่งปลายทางออกหัวดา



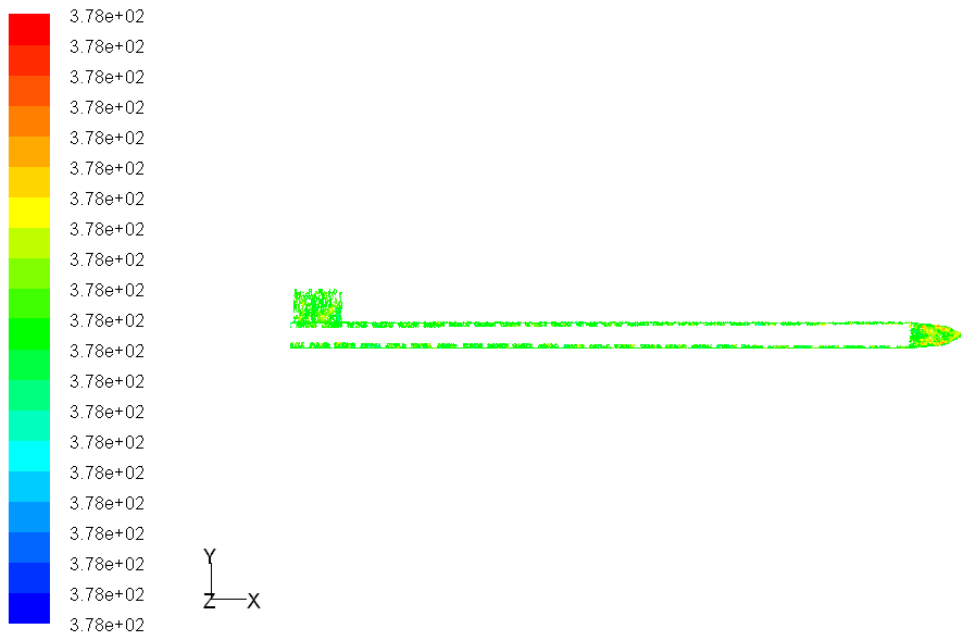
รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทางออกของหัวดา



รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลอง Vector ของ Velocity Magnitude ณ ตำแหน่งทางออกของหัวตายในลักษณะตัดขวางตัวสกรู

3.4.3 อุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้า

ภาพตัวอย่างการจำลองการกระจายตัวของความร้อนในเนื้อมวลของแป้งข้าวเจ้าในกระบวนการอัดตัวที่ความเร็วรอบหมุน 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่ %ความชื้น 54 %ความชื้นเปียกถูกแสดงในค่าของอุณหภูมิดังรูปที่ 3.21 เนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลในสภาวะแบบอุณหภูมิคงตัว (isothermal) ผลการจำลองพบว่าอุณหภูมิในเนื้อมวลแป้งข้าวเจ้ามีความสม่ำเสมอและมีค่าแกว่งในย่านอุณหภูมิแปรรูปแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะดังกล่าวความเค้นมีผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนในเนื้อมวลของแป้งโค โดยรวมขณะถูกแปรรูปไม่มากนัก



Contours of Total Temperature (k) May 01, 2010
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam)

รูปที่ 3.21 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิที่ปรากฏในเนื้อหาของแป้งข้าวเจ้าขณะถูกอัดรีดโดยการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูชัน

3.4.4 อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปกติถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงขีดความสามารถในการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง แต่สำหรับกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องเอกซ์ทรูชันเป็นเครื่องจักรในการผลิตแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และความดันภายในหัวตายบริเวณใกล้ทางออกยังถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความคล้ายคลึงกันของคุณภาพตัวผลิตภัณฑ์ได้ด้วย กล่าวคือ อัตราส่วนค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ต่อความดันบ่งบอกถึงความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์นั้นได้ ซึ่งความหนาแน่นส่งผลถึงลักษณะรูปทรงของตัวผลิตภัณฑ์โดยตรง ดังนั้นโดยปกติหากต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคล้ายคลึงกันผู้ปฏิบัติงานมักปรับแต่งค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ อัตราส่วนของค่าดังกล่าวอยู่ในย่านเหมาะสมสำหรับอัตราการผลิตที่ต้องการ ตารางที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 แสดงผลการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ที่ได้จากแป้งโดข้าวเจ้าดิบความชื้น 47, 54 และ 60 %ความชื้นเปียกตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %

Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.000539275	0.000538956	0.000573397
20	0.001077463	0.001077916	0.001146797
30	0.001615043	0.001616874	0.001720188
40	0.00215230	0.00217210	0.002293579

ตารางที่ 3.10 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 54%

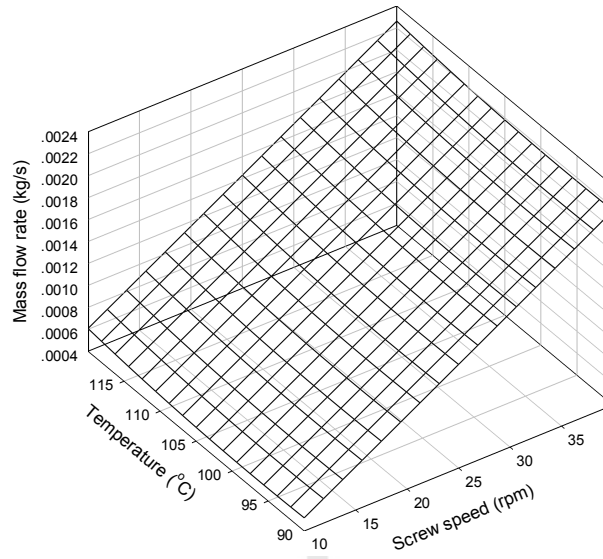
Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.00051602	0.000546243	0.000557931
20	0.001030961	0.001092485	0.00111586
30	0.001545221	0.001638726	0.001673783
40	0.002059175	0.00218497	0.002231699

ตารางที่ 3.11 แสดงผลการจำลองอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %

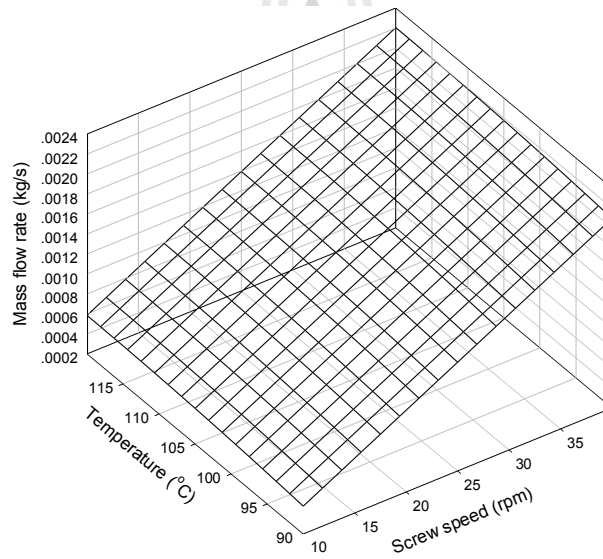
Screw speed (rpm)	Mass flow rate at die exit (kg/s)		
	Temperature 90 °C	Temperature 105 °C	Temperature 120 °C
10	0.000509567	0.000534132	0.000589679
20	0.001019092	0.00106717	0.001179351
30	0.001528648	0.001599629	0.001769015
40	0.002038204	0.002131711	0.002358666

จากตารางที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกอัดผ่านเครื่องเอกซ์ทรูชันในช่วงความชื้น 47-60% ณ ความเร็วรอบสกรูเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องด้วยปริมาณความชื้นที่ใช้ทดสอบจัดว่าอยู่ในช่วงความชื้นที่สูงกว่ากระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันทั่วไป (การกำหนดค่าช่วงความชื้นทดสอบในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ปราศจากระบบเติมน้ำส่งผลให้ต้องปรับสภาพความชื้นแป้งดิบสูงกว่าปกติ) ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์จากผลการจำลองที่ทุกความชื้นมีค่าแปรผันตามกับความเร็วรอบและอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและอุณหภูมิให้มีค่าสูงขึ้นอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปรัชญาการดังกล่าวนี้อธิบายได้จากค่าความเร็วของผลิตภัณฑ์ขณะไหลออกจากหัวดายที่แปรเปลี่ยนภายใต้อิทธิพลของค่าความดันบริเวณใกล้ทางออกของหัวดายอันเป็นผลของความดันย้อนกลับที่หัวดายกระทำต่อเนื้อวัตถุดิบต่างสภาพกันดังกล่าวไว้ในหัวข้อก่อน

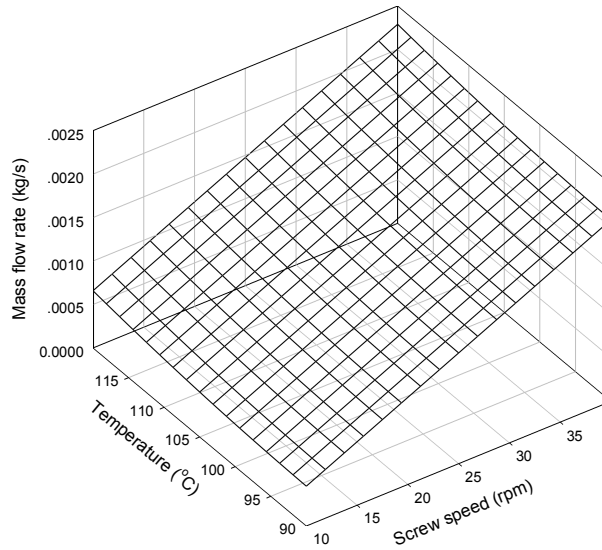
รูปที่ 3.22, 3.23 และ 3.24 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์แป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47, 54 และ 60 % ความชื้นเปียกตามลำดับ



รูปที่ 3.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 47 %ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.23 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของแป้งโดข้าวเจ้าที่ความชื้น 54 %ความชื้นเปียก



รูปที่ 3.24 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลเชิงมวลของโด้แป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ รูปที่ 3.22, 3.23 และ 3.24 สำหรับหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลตามที่ต้องการ สมการความสัมพันธ์พื้นผิวของค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบหมุนต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์แป้งโด้ข้าวเจ้าของทั้งสามความชื้นถูกแสดงไว้สมการที่ (3-19), (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 47 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = 0.0015 + (5.4525 \times 10^{-5} \times N) - (3.2825 \times 10^{-5} \times T) + (1.2771 \times 10^{-8} \times N^2) + (1.7020 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-19)$$

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 54 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = -0.0015 + (5.3993 \times 10^{-5} \times N) + (2.6222 \times 10^{-5} \times T) - (8.3065 \times 10^{-10} \times N^2) - (1.0789 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-20)$$

แป้งข้าวเจ้าความชื้น 60 %ความชื้นเปียก

$$\dot{m} = 0.0013 + (5.4430 \times 10^{-5} \times N) - (3.1466 \times 10^{-5} \times T) - (7.8966 \times 10^{-10} \times N^2) + (1.8163 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (3-21)$$

โดย \dot{m} = อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (kg/s), N = ความเร็วรอบหมุนสกรู (rpm) และ T = อุณหภูมิ (°C)

การประยุกต์ใช้สมการ (3-19), (3-20) และ (3-21) อาจให้ค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์คลาดเคลื่อนจากสถานะการผลิตจริง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความจริงที่พบว่าผลการจำลองที่แสดงถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ปรากฏในรูปของความเร็วยวและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่จากการกระบวนการทดสอบจริงที่ทำในงานวิจัยนี้ เนื่องมาจากข้อจำกัดของวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลทั้งแบบการจำลองเชิงตัวเลขและการใช้สมการเชิงวิเคราะห์ที่มี ณ ขณะนี้ยังไม่สามารถใช้ประมาณค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปแปงซึ่งมีพฤติกรรมการอัดตัวได้เกิดขึ้นขณะถูกทำให้สุกหรือแปรรูปด้วยความร้อน คำอธิบายถึงปัญหาความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการจำลองได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.4.5 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง

จากผลการยืนยันความถูกต้องของกรรมวิธีการจำลองพฤติกรรมการไหลในเครื่องเอกซเรย์ชั้นของน้ำเชื่อมข้าวโพดซึ่งเป็นของไหลประเภทนิวโทเนียนที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้พบว่าผลของอิทธิพลของความเร็วยวหรือความดันที่มีต่ออัตราการไหลที่จำลองได้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งผลดังกล่าวนี้ให้ความสอดคล้องกันกับที่ Li and Hsieh (1995) รายงานว่าผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่นำมาจากข้อมูลอ้างอิงของคณะนักวิจัย Choo (Li et al., 1994 ; Choo et al., 1980) แม้ว่ามิติของสกรูที่ใช้ในสองงานดังกล่าวแตกต่างกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลในเครื่องเอกซเรย์ชั้นของแป้งโดข้าวเจ้าที่จัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนหรือเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางวิทยากระแสเป็นแบบยืดหยุ่นแบบหนืดอาจมีผลต่อความถูกต้องของผลการจำลองก็เป็นได้ และแม้ว่างานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าในกรณีที่มีการจำลองทำโดยสมมติให้ความหนืดของแป้งโดมีค่าคงที่ให้ค่าอิทธิพลของความเร็วยวหรือความดันที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่จำลองได้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับกรณีของน้ำเชื่อมข้าวโพด เนื่องมาจากว่าลักษณะทางกายภาพของแป้งโดข้าวเจ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาระหว่างกระบวนการแปรรูปให้สุกด้วยความร้อนด้วยเครื่องเอกซเรย์ชั้น และวัตถุดิบแป้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดผงที่อัดตัวได้แตกต่างจากน้ำเชื่อมข้าวโพดที่เป็นของเหลวหนืดที่ไม่เกิดการอัดตัวภายใต้สภาวะการผลิตด้วยเครื่องเอกซเรย์ชั้น ดังจะสังเกตได้จากความแตกต่างของเอกซเรย์ชุดหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงกับวัตถุดิบแป้ง

ดังนั้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงความถูกต้องของผลการจำลองที่มีต่อการใช้ทำนายการไหลระหว่างกระบวนการแปรรูปแปงโดด้วยเครื่องเอกซเรย์ชั้น โดยเฉพาะกับผลของความดันที่มีต่ออัตราการผลิตหรืออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลทดลองผลิตจริงเปรียบเทียบกับทั้งผลการจำลอง และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิด power law ตามแบบสมการของ Rauwendaal (2001) ซึ่งผลที่ได้ของค่าความเร็วยว ความดันและอัตราการไหล

เชิงมวลของผลิตภัณฑ์สำหรับกระบวนการแปรรูปแป้งข้าวเจ้าที่ความชื้น 54% และ 40% (ความชื้นเปียก) และอุณหภูมิผลิตเป็น 105 °C แสดงในตารางที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแป้งโคความชื้น 54 %

ความเร็ว รอบหมุน (rpm)	ความดันภายในหัวคาย ณ ตำแหน่งใกล้ทางออก (Pa)		ค่าความ คลาดเคลื่อน ของความดัน (%)	อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ (kg/s)		
	ผลการ ทดลอง*	ผลการ จำลอง		ผลการ ทดลอง	ผลการ จำลอง	ผลเฉลยเชิง วิเคราะห์**
	10	419275		309788	26.11	0.00018
20	489155	382568	21.79	0.00030	0.00109	0.00135
30	489155	432848	11.51	0.00050	0.00164	0.00202
40	668814	472488	29.35	0.00088	0.00218	0.00269

* ค่าความผิดพลาดเท่ากับ ± 68948 Pa หรือ ± 10 Psi, ** สมการผลเฉลยโดย Li และ Hsieh

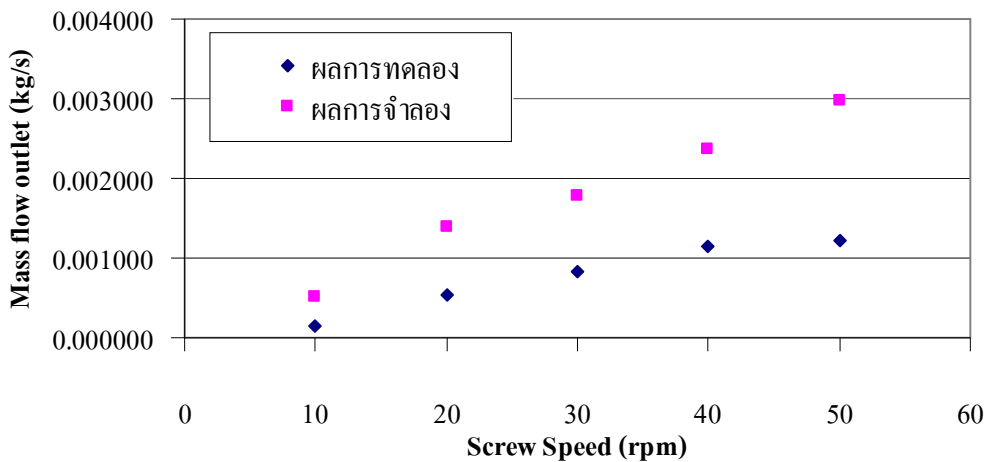
ตารางที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบความดันและอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง สำหรับแปรงโคความชื้น 40 %

ความเร็วรอบหมุน (rpm)	ความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออก (Pa)		ค่าความคลาดเคลื่อนของความดัน (%)	อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ (kg/s)	
	ผลการทดลอง	ผลการจำลอง		ผลการทดลอง	ผลการจำลอง
20	1424917	914903	55.75	0.000533	0.00137986
30	1516847	1093160	38.76	0.000833	0.0017819
40	1516847	1240350	22.29	0.001150	0.00237586
50	1608777	1368050	14.96	0.001228	0.00296982

* ค่าความผิดพลาดเท่ากับ ± 68948 Pa หรือ ± 10 Psi

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วยรอบหมุนสกรูที่มีต่อความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออก และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (อัตราการไหลออก) สำหรับตัวอย่างสภาวะการผลิตที่ใช้แปรงโคความชื้น 54% และ 40% อุณหภูมิผลิตคงตัว 105°C ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ พบว่าทั้งสองกรณีทดลองให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าในทุกความเร็วรอบหมุนที่ทดสอบผลการจำลองค่าความดันภายในหัวคายน ตำแหน่ง ไกล่ทางออกมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการวัดจริงในตำแหน่งเดียวกัน (พิกัดตำแหน่งแสดงไว้ในบทที่ 2) ในขณะที่ผลการจำลองค่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ในทุกความเร็วรอบหมุนให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดลองวัดอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริงค่อนข้างสูงมากดังตัวอย่างภาพของกรณีแปรงโค 40% ที่ปรากฏในรูปที่ 3.25 ผลการเปรียบเทียบที่ได้นี้แตกต่างจากการเปรียบเทียบอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ที่ใช้แบบสมการ Li and Hsieh (1995) ที่ให้ค่าความแตกต่างกันไม่มาก ค่าความแตกต่างของทั้งผลการจำลองหรือผลการคำนวณ โดยใช้สมการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลการวัดจริงมีสาเหตุหลักจากข้อจำกัดของการจำลองพฤติกรรมการไหลโดยโปรแกรม

คำนวณทางพลศาสตร์ของไหลอันเป็นผลมาจากระบบสมการ โครงสร้างวัสดุที่จำเป็นมากต่อการคำนวณเชิงตัวเลขและการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ได้แก่ แบบสมการวิหยากระแส และแบบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความดันหรือความเค้นสำหรับแป้งโดที่ถูกแปรรูประหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่ากรรมวิธีการจำลองที่มีในขณะนี้เพื่อใช้ติดตามพฤติกรรมการไหลของแป้งโดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีข้อจำกัดอยู่เฉพาะการใช้ติดตามได้เพียงโซนหรือช่องทางการไหลช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุซึ่งอาจเป็นไปได้เฉพาะในย่านตวงวัด (metering zone) เนื่องด้วยกรรมวิธีที่มีนั้นยังไม่สามารถติดตามพฤติกรรมการไหลพร้อมการอัดตัว (compaction) ที่เกิดขึ้นเป็นปกติ นอกจากนี้ปัจจัยเรื่องการขาดระบบสมการ โครงสร้างวัสดุเพื่อติดตามค่าความหนาแน่นแล้วตัวแปรสำคัญอีกประการคือความสัมพันธ์แรงเสียดทานระหว่างแป้งโดกับโลหะทำเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งค่าดังกล่าวเกี่ยวพันโดยตรงกับสภาวะการลื่นไถลของแป้งโดขณะถูกขนถ่ายด้วยกลไกการหมุนของสกรู และถึงแม้ว่าเงื่อนไขการจำลองการไหลสามารถระบุสภาวะการเกิดสภาพลื่นไถล (slipping condition) ได้ก็ตามแต่การได้มาซึ่งค่าดังกล่าวจำเป็นต้องมีผลการทดลองเพื่อระบุย่านอัตราเร็วที่ก่อให้เกิดสภาวะดังกล่าวและจำเป็นต้องสร้างเครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะที่มีค่าความละเอียดสูงซึ่งอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

ค่าอัตราการไหลขาออกที่วัดจริงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองในขณะที่ความดันที่วัดจริงสูงกว่าผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระหว่างกระบวนการแปรรูปเม็ดแป้งโดข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์ เม็ดแป้งโดเกิดการอัดตัวขึ้นได้โดยการทำงานของสกรูในเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งเป็นการสร้างกลไกการไหลด้วยแรงผสมระหว่าง drag flow force และ pressure flow force ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนตัวไปด้านทางออก

ของหัวคายเป็นอิทธิพลของ drag flow force การอัดตัวได้ของเม็ดแป้งโดในช่องทางการไหลของเครื่องเอกซ์ทรูชันนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นปกติคงจะเห็นได้จากรายงานวิจัยของคณะนักวิจัย Weert ที่ทำการศึกษาถึงลักษณะการอัดตัวของแป้งโดระหว่างกระบวนการแปรรูปโดยเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งแตกต่างจากการศึกษาในกรณีทั่วไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหรือความเร็วรอบต่ออัตราการผลิตตรงที่นิยมศึกษาโดยสมมติให้แป้งโดขณะแปรรูปมีคุณสมบัติการไหลเหมือนของไหลแบบของหนืดซึ่งไม่มีการอัดตัวเกิดขึ้นระหว่างการไหล เช่น พอลิเมอร์หลอมเหลว น้ำเชื่อมข้าวโพด และพลาสติกซิน (plasticine) เป็นต้น โดยผลศึกษาพบว่าความหนาแน่นของแป้งโดเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นกับค่าความดันในช่องทางการไหลของเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่อาจติดตามได้จากทั้งกรณีการใช้กรรมวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้หรือหลายงานวิจัย เนื่องด้วยการกำหนดสภาวะการไหลแบบไม่อัดตัวยังไม่สามารถทำได้กับแป้งโดเนื่องด้วยข้อจำกัดตรงที่การปราศจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับความหนาแน่นให้ประยุกต์ใช้งานและก็ไม่อาจติดตามได้โดยการใช้การคำนวณเชิงวิเคราะห์จากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ทั้งหมดที่มีสืบค้นพบในขณะนี้ด้วยเหตุผลที่ได้มาซึ่งผลเฉลยที่กำหนดไว้สำหรับกรณีที่ความหนาแน่นเป็นค่าคงตัวเช่นกัน แม้กระนั้นก็ตาม Weert และคณะได้รายงานไว้ว่ากรณีที่มุมขนถ่ายวัสดุของแข็งในช่องทางการไหลในเครื่องเอกซ์ทรูชันในช่วง 1-2 องศา ค่าการอัดตัวได้ของวัสดุในรูปของค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความดันที่เกิดในช่องทางการไหลได้น้อยกว่าผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เปลี่ยนไปของแป้งโดที่สภาพการอัดตัวแตกต่างกัน (Weert, 2001)

หากพิจารณาหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าอัตราการไหลขาออกที่ได้จากการทดลองกับผลจากการจำลองโดยสังเกตจากการทดลองผลิตจริงจะพบว่า การป้อนเม็ดแป้งโดขนาดเล็กในรูปของการป้อนแบบท่วมช่องทางเข้า (over-flooded feeding) เม็ดแป้งโดก็ยังคงถูกขนถ่ายโดยการหมุนของเกลียวสกรูในลักษณะของการไหลที่ขาดความต่อเนื่องซึ่งเม็ดแป้งโดจะถูกอัดกันแน่นขึ้นเมื่อเคลื่อนเข้าสู่โซนอัดตัว ลักษณะดังกล่าวนี้เองที่แตกต่างจากสภาวะการจำลองที่ประยุกต์ใช้ในทุกรณีศึกษาที่มีมาซึ่งกำหนดให้เนื้อวัสดุแป้งโดมีการไหลแบบต่อเนื่องหรือไม่เกิดสภาพอัดตัวได้นั่นเอง และต่างจากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ซึ่งอัตราการป้อนหรือการไหลเข้าของแป้งโดจัดว่าเป็นการขนถ่ายแบบมีเนื้อวัสดุอยู่เต็มช่องทางการไหลและไม่มีการอัดตัวเกิดขึ้น โดยปริยายเช่นกัน การสมมติดังกล่าวของทั้งสองกรณีเป็นที่นิยมสำหรับงานศึกษาวิจัยการแปรรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันซึ่งไม่ปัญหาเนื่องจากเม็ดพอลิเมอร์จะหลอมเป็นของเหลวหนืดจึงทำให้ไหลอยู่เต็มช่องทางการไหล ในกรณีของการใช้วิธีการจำลองการไหลของแป้งโดโดยสมมติให้เป็นการไหลเป็นเต็มช่องทางการไหลเพื่อให้สามารถกำหนดบนเงื่อนไขของกฎการอนุรักษ์มวลได้จึงให้ความเหมาะสมซึ่งอันที่จริงนั้นเป็นเงื่อนไขการเช็การลู่เข้าสู่ค่าตอบของผลการจำลองดังจะเห็นได้จากผลที่ใกล้เคียงกันมากระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของขาเข้าและขาออก ปรากฏการณ์การอัดตัวได้ของแป้งโดอัน

เป็นผลที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จาก โชนการป้อนเม็ดแป้งโดนี้เองเป็นข้อจำกัดของการจำลองพฤติกรรม การไหลแบบเต็มเกลียวสกรูแม้จะกำหนดให้ใช้สภาวะการผลิตแบบอนุกรมกันแล้วก็ตาม หากพิจารณาผลสังเกตการณ์เรื่องการอัดตัวนี้ร่วมกับค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามค่าความดันใกล้ทางออกของหัวตาย ยังพบว่าปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นมีผลกระทบน้อยต่อการจำลองเนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความดันที่ปลายทางออกเพิ่มขึ้นจากความดันทางเข้าเพียง 16 bar ซึ่งจะมีผลให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียง 24.3 kg/m^3 (จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลของ Weert และคณะที่พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อหนึ่งหน่วยความดันเป็นค่าประมาณ 1.62 kg/m^3 ต่อ 1 bar) ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าหากคำนึงถึงกฎการอนุรักษ์มวลโดยตัดปัจจัยเรื่องค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ปัจจัยอื่นที่เหลือที่ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลที่วัดจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าการจำลองในทุกความเร็วรอบหมุนสกรูนั้นมาจากเรื่องความเร็วของการเคลื่อนตัวของแป้งโดสุกในเครื่องเอกซ์ทรูชัน ค่าความเร็วได้รับผลกระทบจากสองเรื่องหลักคือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชั้นแป้งโดด้านนอกที่สัมผัสกับโลหะ อาจปรากฏค่าในย่านที่ก่อให้เกิดสภาวะการลื่นไถลส่งผลให้แป้งโดสุกเคลื่อนตัวออกที่หัวตายได้ช้าลงในสภาวะการผลิตจริง และอีกปัจจัยมาจากการอัดตัวกันของเม็ดแป้งโดก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลระหว่างเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกของหัวตายของเครื่องเอกซ์ทรูชันมีค่าลดลงอย่างมาก แม้ว่าแรงยึดเหนี่ยวนี้ควรถูกสะท้อนในรูปของค่าความหนืดของแป้งโดด้วยสมการวิทยากระแสที่ตรวจวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่องมือที่ให้ความถูกต้องสูงแล้วก็ตาม ผลการจำลองนี้ยังยืนยันถึงความจำเป็นมากของการได้มาก่อนซึ่งสมการวิทยากระแสของแป้งโดภายใต้สภาวะการแปรรูปที่ใกล้เคียงกับสภาวะการแปรรูปที่เกิดขึ้นจริงในเครื่องเอกซ์ทรูชันเพื่อให้งานการจำลองพฤติกรรม การไหลมีความถูกต้องสูง

นอกจากการสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่นำเสนอในแง่สภาวะการจำลองที่นิยมใช้กันมากในหมู่นักวิจัยที่ศึกษาถึงกระบวนการแปรรูปแป้งโดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชัน (Wang et.al., 2004; Gopalakrishna et.al., 2003; Kumar and Kokini 2003; Dhanasekharan and Kokini ., 2003; Yeh et.al., 1999; Syrjala., 1999; Singh et al., 1997; Chang and Lin., 1995; Karwe and Jaluria ., 1990) ความคลาดเคลื่อนในแง่ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ควรกล่าวรวมไว้ในที่นี้ว่าสมการผลเฉลยของ Rauwendaal ที่ประยุกต์ใช้ในที่นี้มีที่มาจากสมมติให้ช่องทางการไหลเป็นรูปช่องสี่เหลี่ยมยาวไม่จำกัด (parallel plate model) อันเกิดจากการคลี่ช่องทางการไหลตามเกลียวสกรู และให้ boundary conditions เป็นแบบที่ใช้การหมุนปลอกสกรู ด้วยการสมมติดังกล่าวนี้ส่งผลให้อธิพจน์ของความโค้งและการบิดตัวของเกลียวสกรูที่มีต่อความเร็วของวัสดุที่ถูกขนถ่ายไปไม่ได้รับการพิจารณาถึง แม้ว่าขณะนี้จะมีคณะนักวิจัยหลายคนสนใจดำเนินงานวิจัยและ

พัฒนาเทคนิคการหาแบบสมการผลเฉลยของของไหลผ่านสกรูเพื่อนำเสนอแบบสมการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ใหม่โดยคำนึงถึงอิทธิพลของความโค้งและการบิดตัวของเกลียวสกรู ได้แก่ เทคนิค generalized integral transform, เทคนิคการหาผลเฉลยแบบอนุกรมกับการไหลใน helical rectangular channel, และ เทคนิคการแก้ระบบสมการ transport equations โดยใช้ helical coordinate system เป็นต้น (Alves et. al., 2009 ; Bereaux et.al., 2004 and Yu et .al., 1997) แบบสมการผลเฉลยดังกล่าวยังต้องได้รับการพิสูจน์ว่าเหมาะสมสำหรับของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนหรือไม่เนื่องด้วยผลการทดสอบผลเฉลยสำหรับนอนนิวโทเนียนกลับมักนำเสนอรายงานวิจัยเฉพาะของไหลชนิดนิวโทเนียนหรือรายงานวิจัยที่นำเสนอของไหลนอนนิวโทเนียนแม้ผ่านการทดสอบก็อาจมีข้อจำกัดสำหรับนอนนิวโทเนียนบางประเภทดังตัวอย่างที่รายงานไว้โดย Bereaux และคณะ เนื่องด้วยงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตเฉพาะการผลิตแบบอนุกรมกึ่งตัว และเป็นการไหลแบบไม่อัดตัวการเปรียบเทียบผลการจำลองจึงเลือกใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh (1995) ที่เป็นที่ยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย

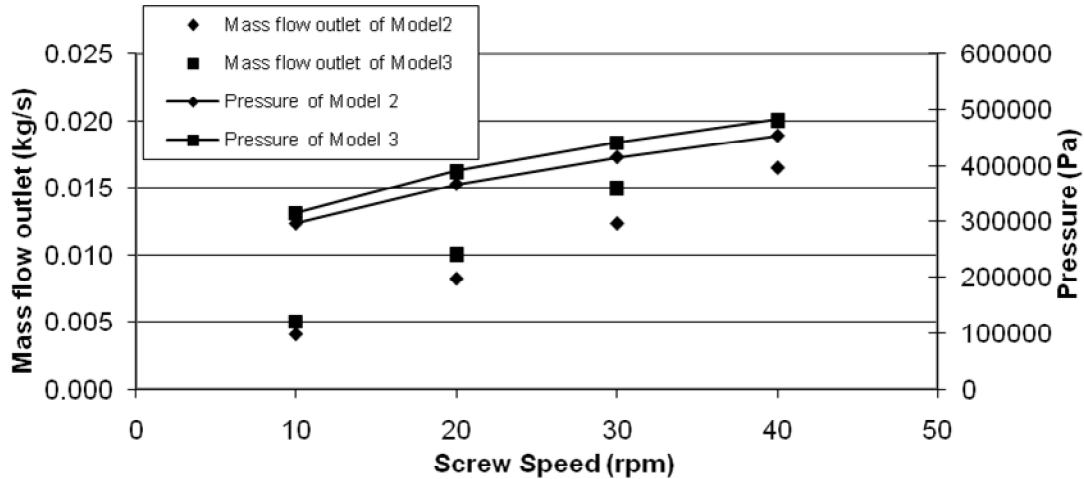
ดังนั้นแม้ว่าผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหรือความดันและค่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังคงเป็นไปได้ในด้านการให้แนวโน้มนำสำหรับการกำหนดค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตที่ชัดเจนตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยเนื่องด้วยแนวโน้มนำความสัมพันธ์ของผลของความเร็วรอบที่มีต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลการจำลองมีค่าเดียวกันกับผลการทดลอง อีกทั้งจากการสำรวจข้อมูลรายงานวิจัยเฉพาะเรื่องการแปรรูปแป้นโคด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันพบว่ารายงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอผลการจำลองนั้นนิยมนำเสนอในรูปอัตราการป้อนวัตถุดิบต่อความดันซึ่งค่าดังกล่าวย่อมมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก็ยังมีค่าเท่ากับอัตราการป้อนวัตถุดิบโดยปริยายดังที่นำเสนอไว้ในส่วนต้น หรือเป็นการจำลองที่ไม่นับรวมชิ้นส่วนของหัวคายที่ทำหน้าที่สร้างความดันย้อนกลับ (back pressure) อันเป็นที่มาของการอัดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแปรรูปแป้นโค การทำนายผลของความดันที่มีต่ออัตราการไหลจึงไม่ปรากฏค่าความคลาดเคลื่อน (Wang et. al., 2004; Kumar and Kokini 2003; Yeh et.al., 1999) กล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการนำผลงานวิจัยที่ได้จากการจำลองชิ้นนี้ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมกระบวนการแปรรูปแป้นโคเข้าเจ้าด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันไปประยุกต์ใช้ในงานหาค่าเหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตจริงจึงมีเงื่อนไขที่ให้ความถูกต้องสำหรับกรณีที่แป้นโคอัดตัวอยู่เต็มช่องทางการไหลเท่านั้น ทั้งนี้การประยุกต์ค่าไปใช้ในกรณีที่อัตราการป้อนเม็ดแป้นไม่เต็มช่องทางการไหลจำเป็นต้องทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์กับค่าแรงหรือความดันที่สัมพันธ์กับการอัดตัวได้ของแป้นโค (compaction factor)

3.4.6 มิติของสกรูที่มีผลต่อความดัน

นอกจากอุณหภูมิ ความเร็วรอบรวมถึงความชื้นที่มีอิทธิพลต่อความดันแล้วงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลจากมิติของสกรูที่มีผลต่อความดันในเนื้อแป้งข้าวเจ้าด้วย โดยทำการจำลองการอัดตัวของแป้งข้าวเจ้าภายในเครื่องเอกซ์ทรูชัน model 2 และ model 3 ที่มีอัตราส่วน D:H แตกต่างกันซึ่งมีค่า D:H เท่ากับ 6 และ 4 ตามลำดับ แต่ยังคงมิติส่วนอื่นให้มีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ สำหรับการสร้าง mesh element ให้กับช่องทางการไหลของสกรู model 2 และ model 3 ใช้เทคนิคและวิธีการรวมถึงความละเอียดเช่นเดียวกับการใช้ในการสร้าง mesh element ให้กับสกรู model 1 ซึ่งได้รับการตรวจสอบแล้วว่ามีความถูกต้องสูงเพียงพอต่อการจำลอง ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า mesh element ที่สร้างให้กับสกรู model 2 และ model 3 นั้นมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการจำลองเช่นเดียวกัน การจำลองที่กำหนดให้อัตราส่วน D:H ไม่เท่ากันทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วน D:H ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับความลึกของช่องทางการไหลของแป้งโคข้าวเจ้าภายในเครื่องเอกซ์ทรูชัน ผลการจำลองพบว่าเมื่อความลึกของช่องทางการไหลมีค่ามากขึ้นหรืออัตราส่วน D:H ลดลงความดันมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการเปรียบเทียบความดันเนื่องจากความลึกของช่องทางการไหล สำหรับ model 2 และ model 3

Screw speed(rpm)	Pressure (Pa)	
	Model 2 D:H = 6	Model 3 D:H = 4
10	297480	315595
20	367399	389789
30	415727	441073
40	453863	481571



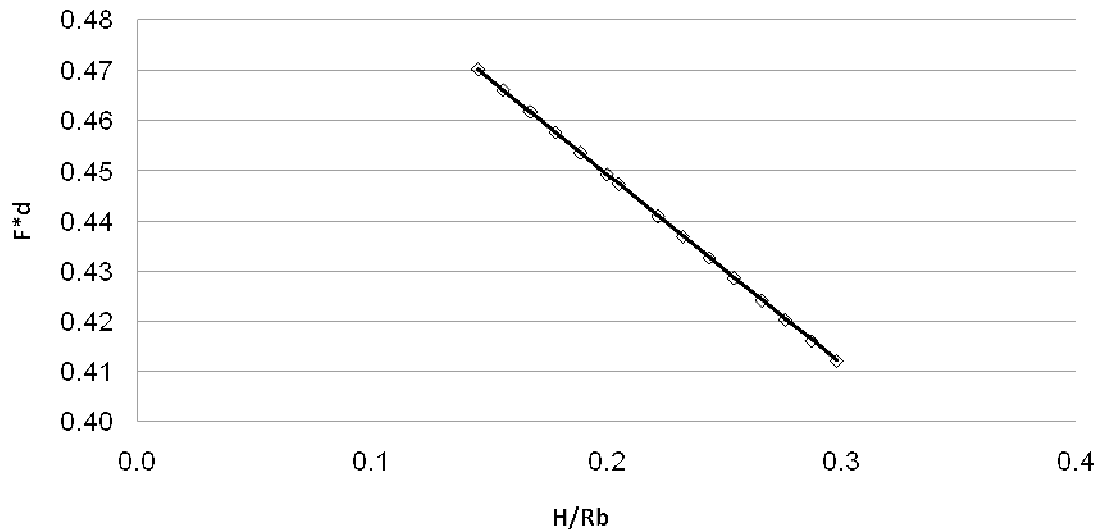
รูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนสกรูกับอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์และความดันของ Model 2 และ Model 3 ตามลำดับ

พิจารณารูป 3.26 พบว่าเมื่อเพิ่มความลึกให้กับช่องทางการไหลภายในสกรูหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือลดอัตราส่วน D:H ลงจากอัตราส่วน D:H เท่ากับ 6 เป็น D:H เท่ากับ 4 หรือลดลง 33% พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากหัวคามีค่าเพิ่มมากขึ้น 21% และความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น 6% ทุกๆรอบหมุนของสกรู จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า การเพิ่มความลึกของช่องทางการไหลภายในสกรู (อัตราส่วน D:H ลดลง) ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์และความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น

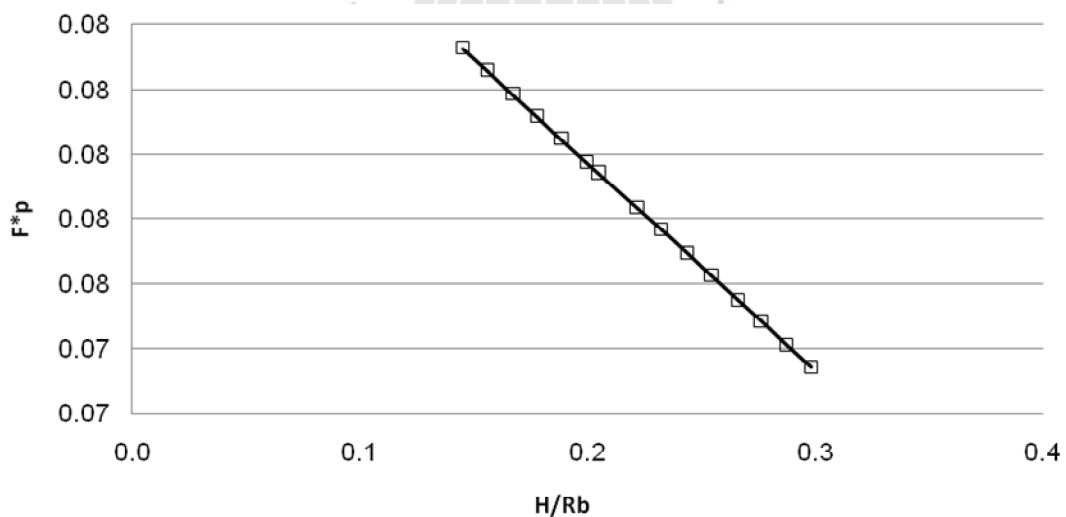
3.4.7 ตัวแปรไร้มิติ

ตัวแปรไร้มิติถูกใช้เป็นปัจจัยในการออกแบบมิติของสกรู รูปที่...แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of drag flow (F^*_d) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_0) ที่ค่า $\phi_b = 18.4^\circ$ จากรูปพบว่าเมื่อค่า H/R_0 เพิ่มมากขึ้นค่า F^*_d มีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นซึ่งมีหมายความว่าเมื่อความลึกของช่องทางการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดลากวัสดุของสกรูดังกล่าวนั้นมีค่าลดลง นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า factor of pressure flow (F^*_p) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_0) ก็มีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือเมื่อค่า H/R_0 เพิ่มขึ้นค่า F^*_p มีค่าลดลงดังแสดงไว้แล้วในรูปที่.... ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เพื่อหาค่า H/R_0 ที่มีความเหมาะสมสำหรับค่า $\phi_b = 18.4^\circ$ เพื่อให้สกรุนั้นสามารถดูดลากวัสดุให้เคลื่อนที่ไปสู่ปลายทางออกได้ตามที่ต้องการ นอกจากนั้นแล้วรูปที่... ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับค่าตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อนาทีตามลำดับ รูปดังกล่าวจะ

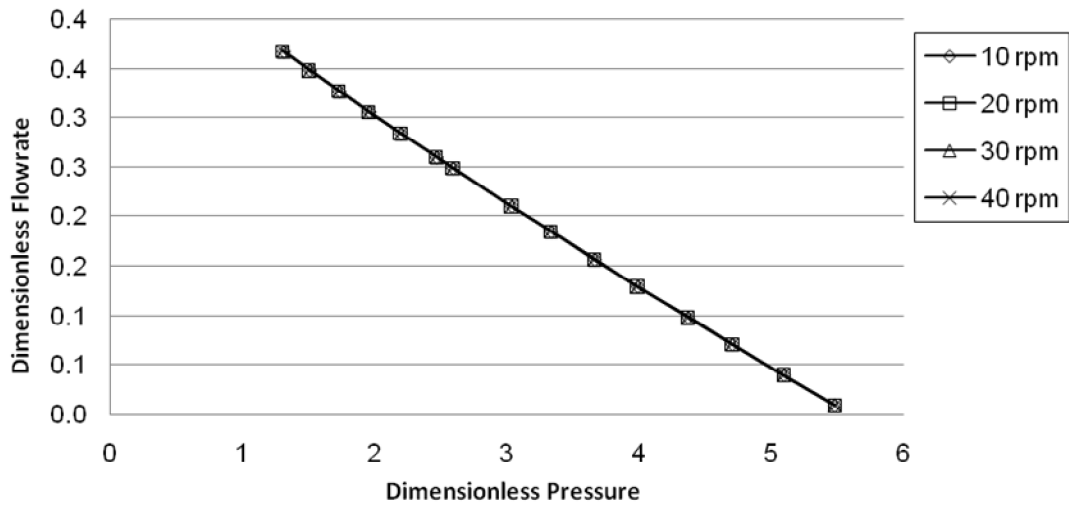
ถูกใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความดันโดยค่าจุดตัดในแกนนอนบ่งบอกถึงค่าสูงสุดของตัวแปรไร้มิติความดัน จากรูปพบว่ามามีค่าประมาณ 5.5 รูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อทำการเปลี่ยนรอบหมุนของสกรูกลับพบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวแปรไร้มิติ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความเร็วของรอบหมุนไม่มีผลต่อตัวแปรไร้มิติหากมิติของสกรูมีค่าคงตัว



รูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of drag flow (F^*_d) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_b)



รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง factor of pressure flow (F^*_p) กับค่าอัตราส่วนของความลึกของช่องทางการไหลต่อรัศมีของปลอกสกรู (H/R_b)



รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรไร้มิติอัตราการไหลกับตัวแปรไร้มิติความดันที่ความเร็วรอบหมุน 10 20 30 และ 40 รอบต่อนาที



บทที่ 4

สรุปรายงานการวิจัย

ผลงานวิจัยเรื่อง “การจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล” เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Fluent®) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชันโดยใช้ผลการจำลองการไหลชนิดสามมิติในการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกลุ่มค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตของเครื่องเอกซ์ทรูชันที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของแป้งโดซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้ประมาณค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละค่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ขอบเขตงานวิจัยกำหนดไว้ที่การศึกษากระบวนการไหลของแป้งโดเข้าไว้ในเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยวที่มีรูปทรงต่างกันสามแบบ โดยการจำลองครอบคลุมอิทธิพลของตัวแปรหลัก ได้แก่ ความชื้นของแป้งโดดิบ อุณหภูมิแปรรูป ความเร็วรอบหมุนสกรู และมิติของแบบสกรูในเรื่องค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Fluent®) สามารถประยุกต์ใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโดในเครื่องเอกซ์ทรูชัน โดยกรรมวิธีที่ใช้ในการสร้าง mesh elements และกรรมวิธีที่กำหนดใช้ในการจำลองการไหลชนิดสามมิติผ่านการตรวจสอบยืนยันความถูกต้องว่ามีค่าความเร็ว และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันกับผลการผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของ Li and Hsieh และให้ผลสอดคล้องกันกับผลการทดลองของ Choo ทั้งนี้ผลการทดลองแปรรูปแป้งโดเข้าด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ทำในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดของการประยุกต์ใช้ผลการจำลองอยู่เพียงการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของวัสดุในสภาพแบบไม่อัดตัวเท่านั้น หรือยังไม่ครอบคลุมถึงกระบวนการแปรรูปของแป้งโดดิบเป็นแป้งโดสุกซึ่งมีสภาพอัดตัวได้อันเนื่องมาจากกลไกการทำงานของการขนถ่ายวัสดุของสกรู แม้กระนั้นก็ตามผลการจำลองยังคงให้ความถูกต้องสูงในกรณีที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลบนสมมติฐานว่าวัสดุที่แปรรูปมีอยู่เต็มช่องทางการไหลหรือไม่เกิดการอัดตัวได้ซึ่งสอดคล้องกันกับความนิยมใช้เป็นข้อกำหนดเบื้องต้นของคณะนักวิจัยจำนวนมากในบทความตีพิมพ์ว่าด้วยเรื่องการจำลองกระบวนการแปรรูปแป้งโดหรือวัตถุดิบอาหารในเครื่องเอกซ์ทรูชัน

2. งานวิจัยนี้นำเสนอกรรมวิธีวิเคราะห์และแบบสมการวิทยากระแสของแป้งโดเข้าด้วยความชื้นในช่วง 47-60% ซึ่งจัดว่าเป็นแบบสมการ โครงสร้างที่สำคัญที่สุดที่ต้องทราบเพื่อประกอบการประยุกต์ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของแป้งโด ผลวิจัยแสดงให้เห็นว่าความหนืดปรากฏของแป้งโดเข้าจะจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุชนิด pseudoplastic โดยมีค่าแปรผกผันกับความชื้น

ของแป้งโดดิบและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิแปรรูปในรูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนซ์ของอัตราส่วนอุณหภูมิอ้างอิงต่ออุณหภูมิไม่ทราบค่า กรรมวิธีการวิเคราะห์หาแบบสมการวิทยากระแสที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ค่าความหนืดปรากฏต่ำสุดได้ถูกต้อง ขณะที่ให้ค่าประมาณการของค่าความหนืดปรากฏสูงสุด

3. ผลการจำลองการไหลชนิดสามมิติของแป้งโดข้าวเจ้าในเครื่องเอกซ์ทรูชันภายใต้สภาวะการแปรรูปแบบอุณหภูมิคงตัว และการไหลแบบไม่อัดตัว พบว่าพฤติกรรมการไหลมีความสัมพันธ์กับกลุ่มค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการผลิตของเครื่องเอกซ์ทรูชันที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ค่าความร้อนในรูปของอุณหภูมิที่ใช้แปรรูปแป้งโด ความเร็วรอบหมุนของเพลาสกรู และตัวแปรด้านรูปทรงทางเรขาคณิตของแบบสกรู (ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูต่อความลึกของช่องทางการไหล) ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

- สำหรับแป้งโดข้าวเจ้าที่มีความชื้นตั้งต้นเท่ากัน พบว่าค่าความดันของแป้งโดข้าวเจ้าภายในหัวคายใกล้ทางออกเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความเร็วรอบหมุนและอุณหภูมิแปรรูปในรูปของสมการพหุคูณแบบพาราโบลา

- ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของแป้งโดข้าวเจ้าภายในหัวคายใกล้ทางออกของแต่ละความเร็วรอบหมุนสกรูสามารถอธิบายได้ด้วยสมการพหุคูณของค่าอุณหภูมิแปรรูปและความชื้นตั้งต้นเช่นเดียวกัน โดยมีค่าแปรผกผันกับความชื้นและอุณหภูมิ

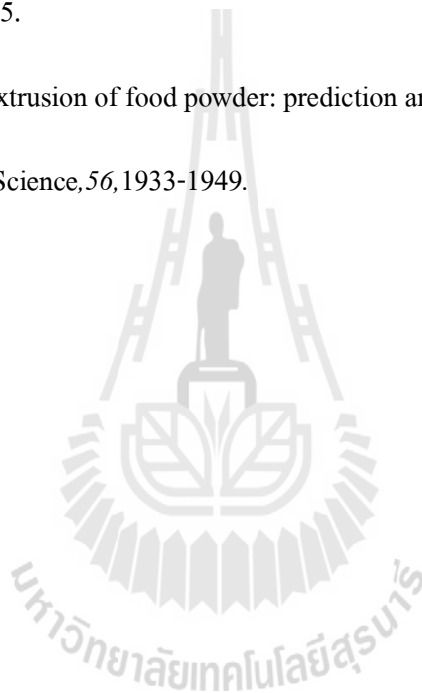
- ผลการจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และความดันภายในหัวคายบริเวณใกล้ทางออกยังถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความคล้ายคลึงกันของคุณภาพตัวผลิตภัณฑ์ได้เฉพาะในเงื่อนไขว่าแป้งโดอัดตัวอยู่เต็มช่องทางการไหล หรือพิจารณาได้ว่าเป็นค่าอัตราการไหลสูงสุดหากสามารถป้อนแป้งโดดิบด้วยอัตราไหลเดียวกันนี้ และเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานสมการพหุคูณแบบพาราโบลาที่แสดงถึงค่าความเร็วรอบหมุนและอุณหภูมิแปรรูปที่มีผลต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ได้ให้มาด้วยในที่นี้ ทั้งนี้การประยุกต์ใช้ผลการจำลองอัตราไหลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ี้ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์กับค่าแรงหรือความดันที่สัมพันธ์กับการอัดตัวได้ของแป้งโด (compaction factor) และการนำผลการจำลองนี้ไปใช้กับแบบสกรูเดียวกันที่มีมิติใหญ่ขึ้นจำเป็นต้องทราบค่า scaling factor

บรรณานุกรม

- Bhattacharya M and Hanna M.A., 1986. Viscosity modeling of dough in extrusion, *Journal of Food Technology*, 22, 167-174.
- Bertrand F., Tanguy P.A., and Thibault F., 1997. A three-dimensional fictitious domain method for incompressible fluid flow problems, *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 25, 719-736.
- Bertrand F., Thibault F., Delamare L. and Tanguy P.A., 2002. Adaptive finite element simulations of fluid flow in twin-screw extruders, *Computers and Chemical Engineering*, 1-10.
- Bird R.B., Armstrong R.C. and Hassager O., 1987. Dynamics of polymeric liquids, Vol. 1, *Fluid Mechanics*, 2nd edition, John Wiley, New York.
- Cervone N.W. and Harper J.M., 1978. Viscosity of an intermediate moisture dough, *Journal of Food Process Engineering*, 2, 83-95.
- Chang R.Y. and Lin K.J., 1995. The hybrid FEM/FDM computer model for analysis of the metering section of a single screw extruder, *Polymer Engineering and Science*, 35, 1748-1757.
- Darby R., 1976. *Viscoelastic Fluids*, Marcel Dekker, New York.
- Elibirli B. and Lindt J.T., 1984. A note on numerical treatment of the thermally developing flow in screw extruders, *Polymer Engineering and Science*, 24, 482-487.
- Fenner R.T., 1977. Developments in the analysis of steady screw extrusion of polymers, *Polymer Engineering and Science*, 18, 617-635.
- Gopalakrishna S. and Jaluria Y., 1992. Modeling of starch gelatinization in a single screw extrude in *Food Extrusion Science and Technology* (J.L. Kokini, Ho C.T., and Karw M.V., editors), Marcel Dekker, New York.
- H K Versteeg and W Malalasekera., 2007 . An Introduction to COMPUTATIONAL FLUIDDYNAMICS, The Finite Volume Method, 2nd edition, Peason Education Limited, England.

- Karmal M.R. and Ryan M.E., 1989. Models of material behavior in Fundamentals of computer modeling for polymer processing (C.L. Tucker III, editor), SPE, New York.
- Karwe M.V. and Jaluria Y., 1990. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a single screw extruder for non-Newtonian fluids, Numerical Heat Transfer, *17*, 167-190.
- K.P Choo, N.R. NEELAKANTAN and J.F.T.PITTMAN., 1980. experimental Deep-Channel Velocity Profile and Operating Characteristics for a Single-Screw Extruder. Polymer Engineering and Scienc, *20*,349-356
- Kumar M. Dhanasekharan and Jozef L. Kokini., 2003. Design and scaling of wheat dough extrusion by numerical simulation of flow and heat transfer, Journal of Food Engineering, *60*, 421-430.
- Lindt J.T., 1989. Flow of a temperature dependent power law model fluid between parallel plates: an approximation for flow in a screw extruder, Polymer Engineering and Scienc, *29*, 471-478.
- L.J Wang et al., 2004. Finite Element Modeling of Fluid Flow , Heat transfer and Melting of Biomaterial in a single – screw Extrusion, Journal of Food Engineering and Physical Properties, *69*,212 -223
- Mackey K.L. and Ofoli R.Y., 1990. Rheology of low to intermediate moisture whole wheat flour doughs, Cereal Chemistry, *67*, 221-226.
- Maddock B.H., 1974. Extruder scale-up by computer, Polymer Engineering and Science, *14*, 853-858.
- Morgan R.G., Steffe J.F. and Ofoli R.Y., 1989. A generalized viscosity model for extrusion of protein doughs, Journal of Food Process Engineering, *11*, 55-78.
- Narpinder Singh and Andrew C.Smith., 1997. A Comparison of Wheat Starch, Whole Wheat Meal and Oat Flour in the Extrusion Cooking Process, Journal of Food Engineering, *34*, 15-32.
- Pearson, J.R.A., 1976. Scale-up of single screw extruders for polymer processing, Plastics and Rubber: Processing, *1*, 113-118.

- Remsen C.H. and Clark J.P., 1978. A viscosity model for cooking dough, *Journal of Food Process Engineering*, 2, 39-64.
- Syrjala S., 1999. On the analysis of fluid flow and heat transfer in the melt conveying section of a single screw extruder, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 35, 25-47.
- Thibault F. and Tanguy P.A., 1994. A numerical model for single screw extrusion with PVC resins, *Polymer Engineering Science*, 34, 1377-1386.
- Y.Li and F.Hsieh. Modeling of Flow in a Single Screw Extruder, *Journal of Food Engineering*, 27, 353-375.
- X. Weert el at., 2000. Screw extrusion of food powder: prediction and performance , *Journal of Chemical Engineering Science*,56,1933-1949.





สัญลักษณ์

a, b	Factors defined in equations (1-12) and (1-24)
D	Screw diameter (m)
D_b	Internal barrel diameter (m)
e	The flight width (m)
F_d^*	Factor of drag flow
F_p^*	Factor of pressure flow
g_z	Pressure gradient in the down channel direction in equation (1-32)
H	The maximum channel depth (m)
k	Consistency index
MC	Moisture Content (%)
\dot{m}	Mass flow rate (kg/s)
N	Screw Speed (rpm)
n	Power law index
n_l	The number of leads
p	Number of parallel flight
P	Pressure (Pa)
P_z	The dimensionless pressure
$\partial P / \partial z$	Pressure gradient in the down channel direction
$\partial P / \partial y$	Pressure gradient in the channel depth direction
$\partial P / \partial x$	Pressure gradient in the cross channel direction

$Q_{leakage}$	Volumetric flow rate of leakage flow (m^3/s)
Q_z	Down channel volumetric flow rate (m^3/s)
R_b	Internal barrel radius (m)
R_s	Screw root radius (m)
T_0	Reference temperature (K, °C)
T	Temperature (K, °C)
\dot{V}	Volumetric flow rate
\dot{V}^0	The dimensionless throughput
v_x, v_y, v_z	Component of velocity in x , y and z direction respectively (m/s)
v_a	Axial velocity (m/s)
v_{bz}	Velocity of barrel in z direction (m/s)
W	Width of channel at the internal radius of barrel (m)
x	Channel width coordinate
y	Channel depth coordinate
z	Down channel coordinate
η	Apparent viscosity (Pa.s)
$\dot{\gamma}$	Shear rate (s^{-1})
μ	Viscosity of the Newtonian fluid (Pa.s)
ϕ	Helical angle of screw
ϕ_b	Helical angle of screw at radius R_b
ω	Rotation speed of screw (1/s)



ภาคผนวก ข

ภาพเขียนแบบทางวิศวกรรมของสกรู

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Department of Food Science, Rutgers, the State University of New Jersey, US ปี ค.ศ. 2001 และระดับปริญญาโทจาก School of Packaging, Michigan State University, US ปี ค.ศ. 1997 มีความเชี่ยวชาญในสาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ และวิศวกรรมอาหาร นอกจากงานสอนในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาบัณฑิต และดุขฎิบัณฑิต ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ยังสนใจดำเนินงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยดำรงตำแหน่งเป็นหัวหน้าหน่วยวิจัยนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์และอาหาร (Packaging and Food Innovation Research Unit, PFIR) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยผลิตผลงานวิจัยในสาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ซึ่งครอบคลุม งานวิจัยด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจนถึงงานพัฒนาซอฟต์แวร์ประยุกต์ด้านการออกแบบบรรจุภัณฑ์ และงานวิจัยด้านนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตอาหาร และงานพัฒนาแบบ ความสัมพันธ์ทางวิศวกรรมการผลิตอาหาร ได้แก่ food process modeling, extrusion processing, non-thermal processing, plasma technology, rheological modeling & measurement และ advanced sensing device

